

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie



Studijní program **M 2301** Strojní inženýrství  
Studijní obor **2303T002** Strojírenská technologie

Zaměření  
Strojírenská metalurgie

**Katedra strojírenské technologie**

POSOUZENÍ PLYNATOSTI VYBRANÝCH SLÉVÁRENSKÝCH  
SMĚSÍ

EXAMINATION OF GASSINESS OF THE SELECTED FOUNDRY  
MIXTURES

**Jiří M a c h u t a**

**KSP – SM – 525**

Vedoucí dipl. práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant: Ing. Martin Seidl

Vedoucí katedry: doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld

**Rozsah práce a příloh:**

Počet stran: 86

Počet tabulek: 20

Počet obrázků: 37

Počet příloh: 5

25.5. 2007

Stránka pro originál zadání dipl.práce

## **A N O T A C E**

### **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program	M 2301 Strojní inženýrství
Diplomant:	Jiří MACHUTA
Téma práce:	Posouzení plynatosti vybraných slévárenských směsí Examination of gassiness of the selected foundry mixtures
Číslo DP:	KSP – SM – 525
Vedoucí DP:	Prof. Ing. Iva Nová, CSc. – TU v Liberci
Konzultant DP:	Ing. Martin Seidl, - TU v Liberci

#### **Abstrakt:**

Tato diplomová práce se zabývá sledováním a měřením plynatosti slévárenských směsí. Práce se skládá ze dvou základních částí (teoretická a experimentální). V teoretické části je popsána základní charakteristika slévárenských směsí, vliv plynatosti formovací a jádrové směsi na vznik vad odlitků a také je popsán mechanismus vzniku a vývinu plynů ze směsi. Součástí této kapitoly jsou informativní výpočty vzniklého množství plynů chemických reakcí, které jsou hlavní příčinou plynatosti slévárenských směsí. Experimentální část je zaměřena na kalibraci nově zkonstruovaného měřicího zařízení plynatosti a na měření plynatosti vybraných vzorků jádrových směsí.

**Abstract:**

This diploma thesis deals with follow up and measure of the mould sand gassiness. The diploma thesis has two basic parts. In theoretical part is described the basic characteristic of the casting mixtures, the influence of the gassiness sand and core mixtures on beginning casting defects. There is described of mechanism by the beginning and evolution of gases from mixtures. The informational computings of the rising by the gas quantity in the chemical change are part of this thesis. These gases are main reason of the gassiness the casting mixtures. The experimental part is directed towards on the calibration of the measuring apparatus. This measuring apparatus was newly engineered and makes it possible to measure the gassiness of the core mixtures.



**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2007

.....  
Jiří MACHUTA  
Rubensova 24  
400 03 Ústí nad Labem

## **Poděkování**

Děkuji své vedoucí diplomové práce paní prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a konzultantům Ing. Martinovi Seidlovi a Ing. Stanislavě Krýslové za cenné rady, věnovaný čas a za cenné připomínky, které přispěly k jejímu vytvoření. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Miroslavu Královi a Mgr. Petře Šoltové za konzultace z oblasti chemie. V neposlední řadě bych rád poděkoval Heleně Vogeltanzové za praktickou i duševní podporu při tvorbě této práce. Poděkování patří také všem dalším, kteří větším nebo menším dílem přispěli k úspěšnému dokončení této diplomové práce.

## OBSAH

<b>OBSAH .....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 CHARAKTERISTIKA SLÉVÁRENSKÝCH FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍ .....</b>	<b>10</b>
2.1.1 OSTŘIVO .....	12
2.1.2 POJIVO .....	16
2.1.3 PŘÍSADY .....	25
2.1.4 VODA.....	25
<b>2.2 MECHANISMUS VZNIKU A VÝVINU PLYNŮ A PAR V PÍSKOVÝCH FORMÁCH.....</b>	<b>25</b>
2.2.1 PLYNOTVORNOST FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍ .....	29
2.2.2 ZPŮSOBY VZNIKU PLYNŮ FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍ.....	32
2.2.3 POPIS VZNIKU A PRONIKÁNÍ PLYNU Z FORMY NEBO JÁDRA DO TAVENINY .....	37
2.2.4 ČINITELÉ ZPŮSOBUJÍCÍ PLYNOVÉ VADY V ODLITKU.....	39
<b>2.3 METODY SLEDOVÁNÍ PLYNATOSTI .....</b>	<b>40</b>
2.3.1 METODY PŘÍMÉ – PROVOZNÍ .....	41
2.3.2 METODY NEPŘÍMÉ - LABORATORNÍ.....	42
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE .....</b>	<b>45</b>
<b>3.1 CHARAKTERISTIKA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>45</b>
3.1.1 KALIBRACE ZAŘÍZENÍ .....	47
<b>3.2 POPIS METODIKY PŘÍPRAVY VZORKŮ PRO SLEDOVÁNÍ PLYNATOSTI .....</b>	<b>52</b>
<b>3.3 PRŮBĚH SLEDOVÁNÍ PLYNATOSTI VYBRANÝCH SMĚSÍ.....</b>	<b>54</b>
<b>3.4 VYHODNOCENÍ ZÁZNAMŮ PLYNATOSTI.....</b>	<b>56</b>
<b>4. DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>77</b>
<b>5. ZÁVĚR.....</b>	<b>81</b>
<b>6. LITERATURA .....</b>	<b>83</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>84</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>85</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>86</b>

**SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ**

$P_f$	přetlak plynů ve formě	[Pa]
$P_m$	metalostatický tlak	[Pa]
$P_p$	odpor kovu proti vniknutí plynové bubliny	[Pa]
$P_{pf}$	přetlak plynů nad hladinou roztaveného kovu	[Pa]
$V_m$	molový objem plynu	[m <sup>3</sup> · kmol <sup>-1</sup> ]
$m$	hmotnost	[kg]
$M_{CaCO_3}$	molární hmotnost CaCO <sub>3</sub>	[kg · kmol <sup>-1</sup> ]
$V$	objem uvolněných plynů	[cm <sup>3</sup> ]
$p$	tlak	[Pa]
$v$	měrný objem	[m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$r$	měrná plynová konstanta	[J · kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$T$	teplota	[K]
$V_0$	objem měřicí soustavy	[m <sup>3</sup> ]
$\Delta V$	změna objemu	[m <sup>3</sup> ]
$\Delta p$	změna tlaku	[Pa]
$P_a$	atmosferický tlak	[Pa]
$m_i$	hmotnost frakce ostřiva	[g]
$d_i$	průměr částice	[cm]
$S_{gi}$	povrch 1 g frakce	[cm <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> ]
$S_{mi}$	měrný povrch frakce	[cm <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> ]
$m_c$	celková hmotnost všech frakcí	[g]
$m_{\check{c}i}$	hmotnost částice	[g]
$K_F$	koeficient prohřátí formy	[m · s <sup>1/2</sup> ]
$H_F$	hloubka prohřátí formy	[m]
$t$	doba ohřevu	[s]

## 1. ÚVOD

Slévárenství je jedním z nejdůležitějších odvětví jak světového, tak i našeho průmyslu. Výroba odlitků v České republice je v posledních dvou letech převážně umocněna prudkým rozvojem automobilového průmyslu. České odlitky automobilových dílů si úspěšně nacházejí své zákazníky i v zahraničí a napomáhají tak tomu, že české slévárenství se stává skutečně jedním z nejvýznamnějších a nejúspěšnějších odvětví našeho hospodářství a nabývá tak už i evropského významu. Ačkoliv dominantní postavení v objemu výroby na trhu zaujímají slitiny železa (litina s kuličkovým grafitem, litina s lupínkovým grafitem, popř. ocel na odlitky apod.), slitiny neželezných kovů (Al, Zn, Cu, apod.) vykazují největší růstový potenciál. Proto je v současné době snaha vyrábět odlitky, které v co největší míře splní zákaznickou požadavku na kvalitu při současném zachování či zvýšení efektivnosti výroby a produktivity práce i s ohledem na ekologické požadavky.

Ke splnění těchto cílů napomáhá i uplatňování nových formovacích a jádrových směsí, které již více splňují přísná ekologická kritéria. Protože pojivové systémy těchto směsí bývají dosti často na organickém základě, je nebezpečí jejich většího uvolňování plynů proti pojivům anorganickým. Z tohoto důvodu je nutno neustále zdokonalovat metody jejich analýzy. Mezi tyto metody se řadí např. sledování plynatosti formovacích a jádrových směsí. Sledování plynatosti je dlouhou dobu věnována velká pozornost. Vznikla řada analyzačních metod a zařízení pro sledování plynatosti. Mezi standardně vyráběná zařízení pro měření plynatosti se řadí např. přístroj Ströhlainův, který sledoval množství plynů uvolněných za zahřátého vzorku na základě změny výše hladiny kapaliny. Dalším zařízením byl přístroj známý pod označením PGM od švýcarské firmy +GF+ a jeho zdokonalený typ označovaný PGD. Systém obou přístrojů využívá kalibrovanou byretu, což vyžaduje náročnou obsluhu. Přístroj PGD měřil tlak uvolněných plynů zahřívání vzorku směsi pomocí manometru.

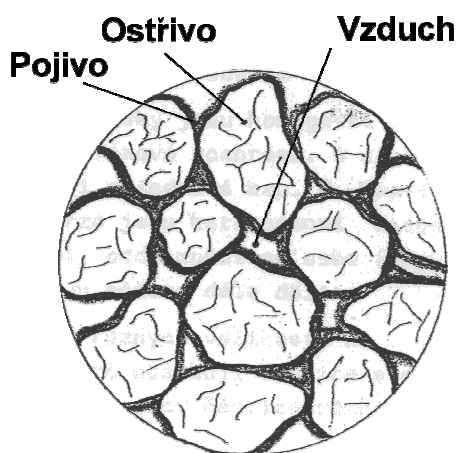
Na katedře strojírenské technologie TU v Liberci byla od 80. let minulého století zkonstruována celá řada měřících zařízení pro nepřímou metodu měření plynatosti formovacích a jádrových směsí. Vždy byla snaha, aby množství uvolněných plynů nebo jejich tlak byly registrovány v závislosti na čase. Tato zařízení byla postupně zdokonalována. Se stanovením plynatosti vybraných jádrových a formovacích směsí souvisí také téma mé diplomové práce, která má název: „Posouzení plynatosti vybraných slévárenských směsí“.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

### 2.1 Charakteristika slévarenských formovacích a jádrových směsí

[4]

Pískové formovací směsi sloužící k výrobě netrvalých - pískových forem, se skládají z těchto složek: ostřivo, pojivo, přísady a u směsí 1.generace voda, která působí jako plastifikátor. U směsí 2.generace ostřivo, pojivo a přísady. Zde z důvodu uvolňování plynů při odlévání sehrávají důležitou úlohu pryskyřice. Na plynatost má vliv také rozklad přísad a nebo jiných látek obsažených ve směsi. Na obr. 2-1 je schéma nejdůležitějších složek formovacích směsí.



Obr. 2-1 Schéma formovací směsi [1]

Formovací směsi jsou tvarovatelné hmoty, od kterých se vyžaduje dobrá formovatelnost, prodyšnost, pevnost za syrova, chemická stálost, malá plynatost a dobrá rozpadavost. Uvedené vlastnosti jsou závislé na vlastnostech jednotlivých složek. Největší vliv na vlastnosti formovací směsi je v pořadí vliv pojiv, přísad a vody (u směsí, které vyžadují vodu). Ideální formovací směs by měla být levná, dostatečně tekutá látka, která po styku s modelovým zařízením vytvoří formu požadované kvality. Formovací směsi lze dělit podle různých způsobů, jako např.:

- a) Modelová - je sypána na model - vytváření líce formy musí být velmi kvalitní, při odlévání a tunutí odlitku je ve styku s kovem.

- b) Výplňová - vyplňuje zbývající objem formy, nemusí být tak kvalitní. Nejčastěji se získává již z použitých slévárenských jader jako směs vratná.
- c) Jednotná - používá se jak pro výrobu líce formy, tak i pro vyplnění zbývajícího objemu formovacího rámu. Nejčastěji to jsou jednotné bentonitové směsi pro strojní formování.
- d) Jádrová - používá se na výrobu jader, je velmi kvalitní. Připravuje se z vysoce jakostních surovin. Po stránce jakosti jsou na ni kladeny ještě větší požadavky než na směs modelovou. Jádrová směs bývá velmi tepelně namáhána a musí odolávat pronikání (penetraci) taveniny mezi póry jádra. Též musí mít dobrou rozpadavost po odlití a delší skladovatelnost.

Podle obsahu volné vody (tj. vody, kterou lze ze směsi odstranit sušením při teplotě 100 °C) lze směsi dělit na:

- A) Bezvodé směsi - obsahují do 0,1 % vody. Nejsou to směsi na bázi jílových pojiv, ale plastifikátorem pojiva jsou organické sloučeniny, např. alkoholy.
- B) Polosuché směsi - obsahují do 3 % vody. Jsou to směsi, které nepotřebují velké plastifikační vlastnosti, neboť jsou určeny pro strojní formování - lisování vyššími měrnými tlaky.
- C) Směsi na syrovo - obsahují do 5 % vody. Nemusí se sušit, zajišťují nejprogresivnější výrobu forem.
- D) Směsi na přisušení - obsahují 6 až 7 % vody. Jsou určeny tam, kde se suší pouze líc forem. Po vysušení je třeba ihned odlévat, aby nedošlo k jeho opětovnému navlhnutí.
- E) Směsi na sušení - obsahují více než 7 % vody. Formy se suší v celém objemu, kdy odstraňujeme volnou vodu při 100 °C.

### 2.1.1 Ostřivo

Je to nosná část formovací směsi, jeho obsah bývá různý. Nejčastěji jeho obsah činí cca kolem 90% formovacího materiálu. Částice ostřiva jsou různého tvaru (kulatá i ostrohranná) a jejich velikost je větší než 0,02 mm. Podle původu se dělí na ostřivo přírodní (např. křemenný písek) nebo umělá (korund, magnezit). Dále se ostřiva dělí na kyselé (křemenné ostřivo), neutrální (šamot, chromit, korund) a zásaditá (magnezit). Nejpoužívanějším ostřivem je ostřivo *křemenné* (jehož chemickou podstatou je  $\text{SiO}_2$ ) tzv. křemenný písek, který se v přírodě vyskytuje v různých lokalitách naší republiky (např. Střeleč, Provodín, Srní). Tavní teplota křemene je  $1700\text{ }^\circ\text{C}$  a je hlavní složkou přírodních formovacích směsí. Křemenné ostřivo je kyselé povahy a nelze ho používat pro výrobu forem určených k odlévání materiálů, které vytváří oxidy zásadité povahy např. Haetfieldova ocel (manganová austenitická ocel). Šamot je vhodným ostřivem pro výrobu těžkých ocelových odlitků. Korund je vysoce žáruvzdorný materiál.

Pro slévárenské účely důležitými vlastnostmi ostřiv jsou žáruvzdornost, žárupevnost, chemická podstata, dále velikost a tvar zrn (ostrohrannost nebo kulatost). Velikost zrn ostřiva je hodnocena síťovým rozbořem, resp. součtovou křivkou zrnitosti, viz příloha č. 1.

**Charakteristiku používaných slévárenských ostřiv a jejich vlastností lze shrnout následovně.**

#### **A. Ostřivo kyselého charakteru**

*Křemenné* - základní surovinou formovacích hmot je oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$ . Je nejrozšířenějším minerálem v přírodě a nachází se ve vhodném zrnění. Jeho teplota tavení je nad  $1700\text{ }^\circ\text{C}$ , takže je vhodný pro výrobu forem k odlévání většiny slévárenských slitin. Jeho nevýhodou je, že při ohřevu prodělává polymorfní přeměny, které se projevují objemovými změnami a poruchami celistvosti formy. Křemen je kyselé sloučenina, která reaguje se zásaditými látkami. Díky těmto reakcím je pak snížena žáruvzdornost formovací směsi.

Oxid křemičitý existuje v mnoha modifikacích: křemen  $\alpha$  a  $\beta$ , cristobalit  $\alpha$  a  $\beta$ , tridymit  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$  a křemenné sklo. Křemenné písky jsou doprovázeny průvodními minerály (jako např. živec, slída, uhličitany), které mohou mít škodlivý vliv na jakost odlitků. Povrch křemenných písků netříděných a chemicky neupravovaných bývá ve většině případů



povlečen hydratovaným křemenem nebo hydroxidem železitým, hlinitým nebo přírodními jíly. Tato vrstva má jen molekulární tloušťku, ale i přesto má velký vliv na přilnavost jílových i organických pojiv.

### **B. Ostřiva zásaditá**

*Magnezitová* - jsou zásaditého charakteru, která se vyrábí z horniny zvané magnezit. Tato hornina obsahuje vedle magnezitu ještě další sloučeniny (vápenaté, křemičité a nebo železitě). Čistý magnezit je oxid hořečnatý  $\text{MgCO}_3$ , hnědé až bělošedé barvy. Jeho vznik je dán působením roztoků obsahujících kyselý oxid hořečnatý na vápence a dolomity. Je určen především pro těžké odlitky z manganových ocelí, které obsahují vysoký podíl  $\text{MnO}$ , který by chemicky reagoval s ostřivem kyselého charakteru, jako např. s  $\text{SiO}_2$  a vytvářel by nízkotavitelné chemické sloučeniny ( $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ).

Magnezitové ostřivo vykazuje malou odolnost proti prudkým změnám teploty. Přísadou chromové rudy, lze snížit tuto citlivost magnezitu.

*Chrommagnezit* - je směsí slinutého magnezitu zvlášť chudého na  $\text{CaO}$  a kvalitní chromové rudy. Tato chromová ruda obsahuje z 80% minerál chromit (59%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  s příměsemi  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{FeO}$ ). Ve formovacích směsích se používá jako velmi kvalitní ostřivo pískových forem pro odlévání speciálních legovaných ocelí.

### **C. Ostřiva neutrálního charakteru**

*Šamotové* - je na bázi vypáleného žáruvzdorného jílu (obsahuje nejméně 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a další složka této žáruvzdorné hmoty je  $\text{SiO}_2$ . Všechny ostatní oxidy, které obsahuje, jsou znečišťujícími příměsemi. Žáruvzdornost těchto ostřiv závisí především na obsahu oxidu hlinitého. Dle žáruvzdornosti se dělí na nízkožáruvzdorný, středněžáruvzdorný a vysokožáruvzdorný. Dle poměru obsahu  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se dělí na kyselé, normální a hlinité šamoty. V kombinaci s pojivem ze žáruvzdorného jílu je šamotové ostřivo vhodné pro výrobu forem těžkých ocelových odlitků nebo těžkých odlitků ze šedé litiny. Do formovacích směsí se volí šamot středně žáruvzdorný normální ( $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 = 2$ ), hutný, drcený na zrno maximálního průměru 3 až 5 mm. Rozdělení zrnitosti se dělí nejlépe tak, aby součtová křivka obsahovala částice všech velikostí.

Šamotové ostřívo neprodělává při ohřevu tekutým kovem polymorfní přeměny a není náchylná ke tvorbě zálupů.

*Ostřívo s vysokým obsahem  $Al_2O_3$*  - je to například Silimanit ( $Al_2O_3 \cdot SiO_2$  - bezvodý křemičitan hlinitý) a mullit ( $3Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ). Silimanit se dováží z Indie nebo se vyrábí uměle pálením plaveného kaolínu, do kterého se přidává umělý  $Al_2O_3$ . Mullit vzniká rozpadem silimanitu za vysokých teplot. Obě tyto ostřiva se vyznačují vysokou žáruvzdorností (nad 38 Ž), dobrou odolností proti náhlým změnám teploty a velkou chemickou stálostí. Používají se hlavně ve formovacích směsích pro metody přesného lití.

*Korund* - je čistý  $Al_2O_3$ . Modrý minerál, který se nazývá safír. Krystalizuje v trigonální soustavě, má tvrdost 9 a v kyselinách se nerozpouští. Průmyslově se vyrábí uměle tavením bauxitu nebo čistých jílu bohatých na  $Al_2O_3$ . Vyznačuje se velmi dobrými vlastnostmi. Jako odolnost proti náhlým změnám teploty, chemická odolnost a objemová stálost. Tyto dobré vlastnosti jsou vykoupeny jeho vyšší cenou a to brání jeho většímu použití ve formovacích směsích. Vhodný je ale jako plnivo do barviva pro těžké ocelové odlitky nebo namáhaná jádra.

*Spinely* - jsou látky, které se řadí do skupiny hlinitanů, např. hlinitan hořečnatý ( $MgO \cdot Al_2O_3$ ) neboli spinel. Oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ ) je amfoterní, což znamená, že ke kyselinám se chová jako zásada a k zásadám naopak jako kyselina. Vůči zásaditým oxidům se tedy  $Al_2O_3$  chová jak kyselina a tvoří s nimi hlinitany. Spinely se užívají jako součásti jiných žáruvzdorných hmot, které po rozemletí mohou sloužit jako ostřívo formovacích směsí pro těžké odlitky nebo pro nátěry forem. Při vysoké žáruvzdornosti mají nízkou spékavost (kolem 1450 °C) a při styku s tekutým kovem vytvářejí kůru na povrchu formy a zabraňují penetraci taveniny mezi ostřívo slévárenské formy.

*Forsterit* - je minerál o chemickém složení  $Mg_2 \cdot SiO_4$ , který se vyrábí pálením mastkových nebo hadcových břidlic a jiných hořečnatých křemičitanů (např. olivínu, serpentinu). Má vysokou žáruvzdornost, vysokou odolnost proti struskám a lepší stálost při změnách teploty než magnesit.

*Olivín* - je přechodná forma křemičitanu hořečnatého a při pálení přechází v konečný minerál forsterit (viz forsterit). Pro svou vysokou žáruvzdornost se také používá přírodní olivín ve formovacích směsích.

*Zirkon* -  $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ , je minerál, který krystalizuje ve čtverečné soustavě. Je hnědočervený o tvrdosti 7,5. Běžně obsahuje malé množství prvků jako je hafnium, thorium nebo uran. Taví se při teplotě 2550 °C. Je to velmi stálý minerál s dobrou odolností proti deformaci v žáru a proti působení zásaditých i kyselých tavenin. Zirkonové ostřívo je drahé, protože ložiska této suroviny se u nás nevyskytují. Používá se pro nejvíce namáhaná jádra nebo nátěry forem ze slitinových ocelí.

#### **D. Ostřiva speciální**

*Grafitová* - jsou používána pro svůj nízký koeficient tepelné roztažnosti. Mají vysokou korozní a chemickou stálost a vysokou tepelnou vodivost, která je až třikrát větší než u křemenného ostřiva. Je málo opotřebitelný tekutým kovem a struskou. Formy při lití je nutné chránit před stykem se vzduchem nad teplotou oxidačního bodu, což je 451 °C. Jinak by docházelo k vyhořívání grafitu. Odlitky z těchto ostřiv jsou velmi přesné s hladkým povrchem.

*Kovová* - se získávají většinou tříděním z odpadu slévárenských tryskačů nebo se přímo používají ocelové nebo litinové broky. Vykazují vyšší tepelnou vodivost než běžně používaná ostřiva. Pokud chceme u běžných ostřiv zvýšit tepelnou vodivost, pak přidáme dle potřeby určité množství kovového ostřiva. Výhoda kovových ostřiv spočívá ve snadné regeneraci a v téměř konstantních vlastnostech. Kovová ostřiva se dají také zmagnetizovat a vytvořit tak dutinu formy podle nemagnetického modelu. Po odlití a ztuhnutí odlitku se magnetické pole zruší a tato forma se rozpadne. Kovová ostřiva mají vysokou snášivost taveninou, a proto je nutné povrch forem opatřit dokonalým nátěrem.

### 2.1.2 Pojivo

Je ta část formovací směsi, která umožňuje soudržnost formovací směsi v kompaktní celek. Pojiv je celá řada a dělí se dle různých kritérií, např. rozlišujeme pojiva anorganická (jíly, vodní sklo) a organická (pryskyřice, tuky, oleje sacharidy). Nebo novějším způsobem dělíme pojiva do 3 generací:

**Pojiva 1. generace** jsou pojiva anorganická, na bázi jílu. Jílová pojiva jsou jedny z nejrozšířenějších. Používají se při formování na syrovo i na sušení, jsou nositelem vaznosti i pevnosti po vysušení směsí syntetických i přirozených. Jílové minerály se rozdělují podle složení chemického, krystalografického, geologického aj. Podle struktury patří mezi silikáty vrstevnaté, které jsou složeny z vrstviček čtyřstěnů ( $\text{SiO}_4$ )<sup>4-</sup> a osmistěnů  $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$  nebo  $\text{Mg}(\text{OH})_6^{4-}$ .

Jílová pojiva vznikla po primární magnetické krystalizaci zemské kůry, kdy docházelo k hydrotermálním procesům, kdy hydrotermální roztoky pronikaly horninami a reagovaly s nimi. Z těchto roztoků vznikly minerály jako kaolinit, montmorillonit, jílové slídy aj. Magnetické materiály se v procesu větrání rozpadaly a jejich sloučením s těmito roztoky vznikly nové stabilní jílové minerály. Jako např. kaolinitické jíly vznikly rozkladem živců v kyselém prostředí, montmorillonit větráním tufů a sopečného popela v zásaditém prostředí. Vlivem postupných přeměn a druhotného přemísťování obsahuje jílovina vedle čistých jílových nerostů také zbytky po zvětrání (jemně rozptýlený křemen, živce a slídu), biogenní příměsi (uhličitan vápenatý ze skořápek mikroorganismů a organické součásti z rostlin), nekřemičitany (limonit, hydrargylit) a novotvary vzniklé po usazení jíloviny (pyrit, dolomit aj.)

Důležitou složkou jílových pojiv je voda, která se vyskytuje ve více formách:

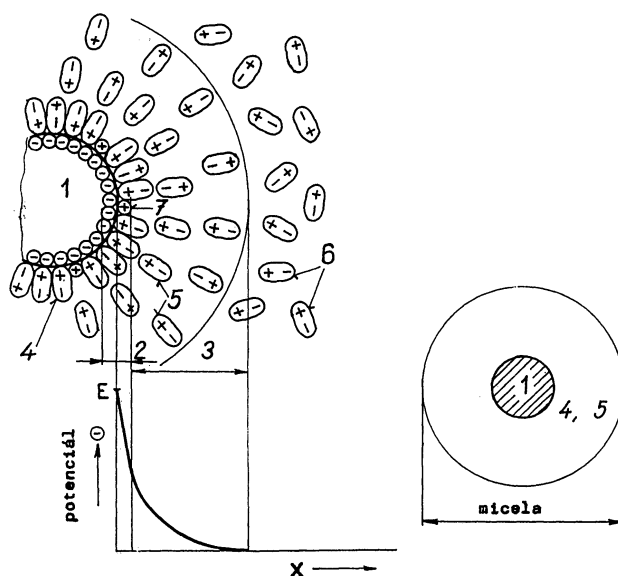
- a) voda vázaná ve formě molekul  $\text{H}_2\text{O}$ ;
- b) voda vázaná ve formě OH skupin;
- c) voda volná, je vázána fyzikálně třemi rozdílnými způsoby (voda vázaná na povrch částic, voda vázaná v mezivrstvovém prostoru mimo hydratační obaly vyměnitelných kationtů, voda vázaná v koordinačních sférách vyměnitelných kationtů).

Charakteristika jíílů používaných ve slévárenství:

- a) *Kaolinitický* - má poměrně vysokou žáruvzdornost, ale malou bobtnavost. Jeho použití je při výrobě ocelových odlitků. Kaolinit -  $(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O)$ , je to hlavní součást horniny kaolinu a žáruvzdorných jíílů. Plavením surového kaolinu se získává plavený kaolin, který obsahuje až 90 % kaolinitu a zbytek jsou příměsi křemene, živce, slídy aj. kaolinitu příbuzné jsou minerály nacrit, dickit a halloysit. Kaolin v surovém stavu je vhodný pro formovací materiály, má vysokou teplotu spékání a je vhodný pro přípravu syntetických směsí na sušení pro odlévání hmotných odlitků z litiny s lupínkovým grafitem a oceli na odlitky. K tomuto účelu je používán žáruvzdorný směsný jííl, který je obchodně nazýván Tumerit K, vyznačuje se vyšší pevností po sušení (cca 1 MPa). Ve slévárnách se však používá ve značné míře kaolinitických jíílů jako pojiva při přípravě dusacích hmot pro opravu kuploven nebo licích pánví.
- b) *Illitický* - má středně velkou žáruvzdornost a bobtnavost. Je hlavním pojivem přírodních směsí. Má nazelenalou barvu. Jsou to slídové jííly, které jsou obsaženy ve většině přirozených formovacích píísků. Hlavní z této skupiny jíílů je glaukonit, který je tvořen drobnými zrnky zelené barvy. Podle barvy i složení je to železato-železitý jííl s 20-25 % oxidů železa. Po dokonalém rozetření je velmi plastický a formovací směsi s ním dosahují vysokých vazností. Spékavost má kolem 1300 °C, takže vytváří na líci formy tenkou spečenou vrstvičku formovacího materiálu, která se nerozpavuje a snadno se odlupuje z odlitků. Glaukonit je hlavní součástí jíílové zeminy slévárenského přirozeného píisku Rájec, který jej obsahuje v množství 12-15 %. Někdy obsahuje minerál limonit, který jej zabarvuje do hněda.
- c) *Montmorillonitický* - má nižší žáruvzdornost, ale velkou bobtnavost. Tento typ jíílu má obchodní název Bentonit nebo Sabenil a používá se pro výrobu forem určených k odlévání litinových odlitků. Montmorillonit -  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O \cdot nH_2O$  - (hlavní naleziště montmorillonitu je ve Francii) je hlavním minerálem horniny zvané bentonit. Jeho název je podle jednoho jeho naleziště Fort Benton v USA. Bentonit vznikl zvětřáním sopečných hornin jako čediče, diabasu a hlavně jejich popela, tj. tufů. Přitom proces bentonitizace probíhal především v zásaditých prostředích na rozdíl od kaolinu, jehož přeměna předpokládá kyselé prostředí. Bentonit se od kaolinu liší tím, že je různobarevný (žlutý, šedý, červený) a na omak mastný. Pro svou dobrou plastičnost a adsorpční schopnosti je hojně využíván

např. v chemickém průmyslu, při těžbě ropy, v zemědělství a především tedy i ve slévárenství. Vysoká vaznost bentonitových jílu ve formovacích směsích umožňuje snížit jejich obsah až 3 násobně oproti jiným typům jílu. Díky malému obsahu jílu ve formovací směsi a tedy zároveň nízkému obsahu vody, je možné odlévat formy na syrovo.

Z ekologického hlediska jsou jílová pojiva velmi příznivá a ve slévárenství ještě velmi používaná.



1 - jádro částice jílu; 2 - elektrická dvojvrstva; 3 - difuzní vrstva; 4 - pevně vázaná voda; 5 - slabě vázaná voda; 6 - volná voda; 7 - adsorbované kationty

Obr. 2-2 Schéma pojivového systému voda – jíl [16]

**Pojiva 2. generace** jsou založena na chemické podstatě pojení, buď za tepla nebo za studena:

a) **Pryskyřičná** - jsou určena pro výrobu jader a forem. Jsou to organické látky, vyznačují se poměrně velkou plynatvostí, avšak podporují dobrou rozpadavost směsi. Význam organických pryskyřic ve slévárenství v posledních letech značně roste a jejich rychlý vývoj ukazuje stále nové možnosti uplatnění. Názvem pryskyřice se označují látky, jejichž podstatou jsou makromolekulární částice, které lze zpracovávat teplem, tlakem nebo obojím současně.

Dle jejich chování při zahřívání se dělí na pryskyřice:

- *termoplastické* - jejichž vlastnosti se při zahřívání mění vratně. Působením tepla tyto pryskyřice měknou a při ochlazení opět tvrdnou.

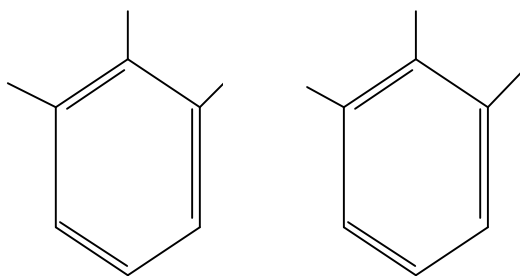
- *termoreaktivní* - které při zahřívání přecházejí nevratně do netavitelného a nerozpustného stavu.

Základní chemické pochody, při kterých vznikají tyto vysokomolekulární sloučeniny, jsou polymerace a polykondenzace.

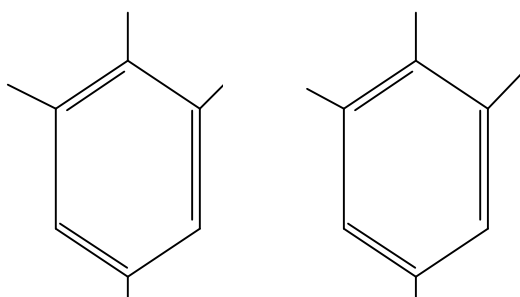
Polymerace je chemická reakce, při které vzniká látka s velkou molekulovou hmotností - polymer, sloučením stejných nebo různých molekul nenasyčených nebo cyklických sloučenin (monomerů), bez vylučování vedlejších produktů. Polykondenzace je reakce dvou nebo několika sloučenin, které mají v molekule nejméně dvě reaktivní skupiny nebo atomy. Polykondenzací vznikají vysokomolekulární látky a vylučují se vedlejší nízkomolekulární produkty. Pryskyřice používané ve slévárenství jako pojiva formovacích a jádrových směsí jsou termoreaktivní, přecházejí tedy nevratně do netavitelného a nerozpustného stavu polykondenzací.

Dnes se ve slévárenství uplatňuje celá řada pryskyřic, především ty, které nemají karcinogenní účinky. Z tohoto důvodu se již nepoužívají pryskyřice fenolformaldehydové. Dnes jsou používané pryskyřice *furanové*, *polyuretanové*, *alkydné*, *novolakové*, *rezolové*.

- 1) *Fenolformaldehydové pryskyřice* - fenoplasty se vyrábějí polykondenzací fenolu s formaldehydem. V kyselém prostředí s přebytkem fenolu se vytvářejí lineární řetězce makromolekul teplem nevytvrditelných pryskyřic (novolaků). Fenolová jádra jsou mezi sebou spojena metylenovými skupinami  $\text{CH}_2$ . Na obr. 2-3 jsou uvedena dvě fenolová jádra, která v tomto spojení dávají základ novolakovým pryskyřicím. Reakcí fenolu v alkalickém prostředí za přebytku formaldehydu získáme rozvětvené makromolekuly, jejichž fenolová jádra obsahují volné metylenové skupiny, které jsou podmínkou tvrditelnosti pryskyřice zvané rezol (viz obr. 2-4). Dle užití ve slévárenských směsích se dělí na fenolformaldehydové nebo kresolformaldehydové roztoky a práškové fenolformaldehydové tmely - novolaky.

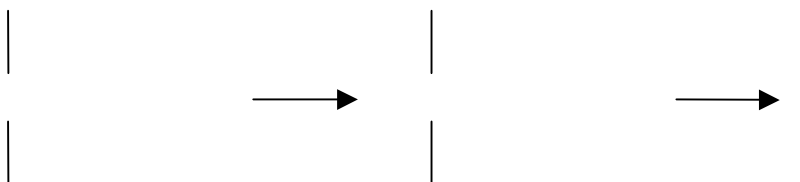


Obr. 2-3 Schéma strukturních vzorců novolakových pryskyřic



Obr. 2-4 Schéma strukturního vzorce pryskyřic rezolu

- 2) *Močovinoformaldehydové pryskyřice* - vznikají polykondenzací jedné molekuly formaldehydu ve slabě kyselém prostředí. V první fázi reakce vzniká přechodně nejprve mono a dimetylmočovina nebo směs těchto látek. Na obr. 2-5 je naznačena první fáze vzniku močovinoformaldehydových pryskyřic.



Obr. 2-5 První fáze vzniku močovinoformaldehydových pryskyřic

V další fázi reakce vznikají složité deriváty s lineární strukturou, které obsahují metylové skupiny a také sterové a metylenové můstky. Když je



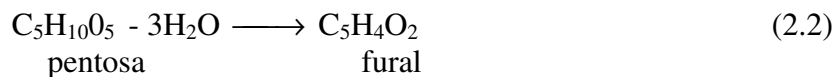
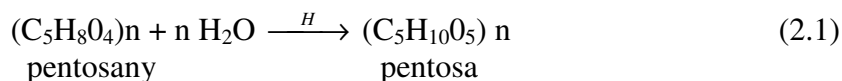
dosaženo požadovaného kondenzačního stupně, reakce se přeruší zavedením alkalického prostředí. Tento dosud nevytvrzený meziprodukt, má tuto lineární řetězovitou strukturu, viz obr. 2-6.



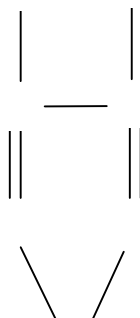
Obr. 2-6 Lineární řetězovitá struktura meziproduktu vzniku  
močovinoformaldehydových pryskyřic

Tyto pryskyřice jsou obvykle ve formě vodního roztoku, příp.se zahušťují nebo v zájmu stability i suší.

- 3) *Furanové pryskyřice* – tato pojiva mají pojmenování od jejich základního heterocyklického uhlovodíku, a to furanu  $C_4H_4O$ , viz strukturní vzorec na obr. 2-7. Základní surovinou pro přípravu furanových pojiv je jednoduchý derivát furanu – fural  $C_5H_4O_2$ . Získává se hydrolýzou pentosanů, které jsou obsaženy ve většině rostlinných látek. Hlavní surovinou pro výrobu furalu jsou dřeviny a rostlinné látky, obsahující pentosany obvykle v rozsahu 20 až 40% a vyskytující se v ekonomickém dosahu a množství u výrobního místa. Přeměna pentosanů v surovině na fural probíhá ve dvou reakcích. Hydrolýza pentosanů na pentosy a dehydratace pentos na konečný fural.



Furanové pryskyřice, které se používají ve slévárenství jsou kopolymery furfurylalkoholu, močoviny nebo fenolu a formaldehydu. Stechiometrické vyjádření těchto chemických reakcí:



Obr. 2-7 Strukturní chemický vzorec

furanu (C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O)

b) **Vodní sklo** – je anorganického charakteru a je určeno pro výrobu forem, pro výrobu jader se téměř nedoporučuje z důvodu velké zbytkové pevnosti. Směsi s vodním sklem se dříve nazývaly chemicky tvrzené. Některé nevýhody směsí s vodním sklem vytvrzovaných CO<sub>2</sub> byly hybnou silou vývoje nových, resp. samotvrdnoucích směsí s vodním sklem. K nevýhodám CT směsí s CO<sub>2</sub> se řadí:

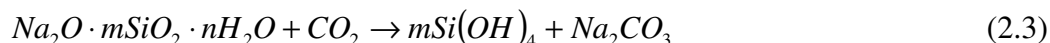
- velmi malá vaznost (pevnost za syrova);
- omezená skladovatelnost jader;
- vysoká spotřeba CO<sub>2</sub>;
- nižší pevnost po vytvrzení ve srovnání s organickými pojivy;
- zhoršená rozpadavost.

Formovací směsi s vodním sklem se dělí do dvou skupin:

- směsi s ovládaným ztužováním (profukováním CO<sub>2</sub>, vytvrzování vzduchem, vytvrzování mikrovlnné a infračerveným zářením);
- směsi bez ovládaného ztužování (ST směsi a samotvrdnoucí směsi).

Pojivový systém vodní sklo – CO<sub>2</sub>; výroba CT směsí

Křemičité ostřívo s vodním sklem se upěchuje v rámu nebo v jaderníku a profoukne oxidem uhličitým. Tento způsob se používá jak pro výrobu forem, tak jader. Celý velice složitý proces se může zapsat chemickou rovnicí:



(vodní sklo + oxid uhličitý → gel kyseliny křemičité + soda)

Oxid uhličitý je suchý, kyselý plyn, který vodní sklo vysuší a současně převede do kyselé rosolovité podoby, tím vzniká gel kyseliny křemičité. Gel kyseliny křemičité postupně přechází v kompaktní hmotu, která získává pevnost v tlaku cca 1 MPa. Dalším produktem je uhličitan sodný, tzv. soda. Ta se může při vyšších teplotách rozkládat na plyn  $\text{Na}_2\text{O}$ , který je škodlivý pro možnost naplynění taveniny.

Celé používání směsí na bázi vodního skla souvisí s jeho horší rozpadavostí.

Proto se v současné době zkouší do vodního skla přidávat různé přísady, které podporují rozpadavost směsí po jejich vytvrzení - tj. snižují zbytkovou pevnost směsi po odlití. Tím byla za uplynulých cca 40 let byla vyvinuta celá řada dalších variant směsí na bázi vodního skla, jako samotvrdnoucí s práškovými nebo kapalnými tvrdidly - estery.

#### Pojivový systém samotvrdnoucích směsí s vodním sklem (ST - směsi)

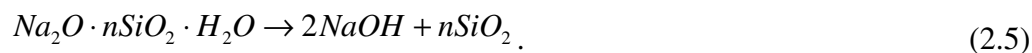
Jsou to směsi s vodním sklem, kdy je proces vytvrzování založen na jiném principu a je doprovázen buď exotermickou reakcí nebo bez exotermické reakce.

K těmto metodám patří ST směsi vytvrzované práškovými čistými kovy (Al, Zn, atd.) nebo práškovým FeSi nebo CaSi, což je N-metoda (Nishyama - proces). Obě skupiny ST směsí využívají principu rozkladu vody kovem (reakce alkalických roztoků s kovy) za vzniku vodíku a velkého tepelného efektu, který podporuje dehydrataci alkalického křemičitanu.

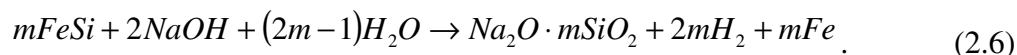
N-proces vychází z velké slučivosti (afinitě) kyslíku s křemíkem:



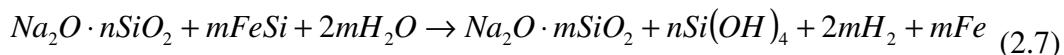
Průběh exotermické reakce je říditelný variací obsahů vodního skla a FeSi ve směsi:



FeSi reaguje s NaOH:



Proces je silně exotermickou reakcí a probíhá tak dlouho, dokud nejsou FeSi a voda spotřebovány:



Celý proces lze zapsat zjednodušeně:



Nevýhodou N - procesu je vznik vodíku, který se vzduchem tvoří třaskavou směs. Rovněž vysoká teplota směsi působí nepříznivě na laky modelů a jaderníků. Uplatnění našly ST směsi vytvrzované práškovými nebo kapalnými tvrdidly.

Nesnadná rozpadavost forem s vodním sklem dala základ pro další způsoby vytvrzování vodního skla.

Vodní sklo může být vytvrzováno esterolem, který obsahuje dvě složky esterů. Jedna složka má nízkou rychlost vytvrzování, druhá vysokou rychlost vytvrzování. Esterol je hnědá až žlutá kapalina, bez zápachu a nemá agresivní účinky. Je netoxická a nehořlavá, v uzavřených nádobách je dlouho skladovatelná. Vytvrzovací proces je založen na dvoustupňové reakci. V prvním stupni dochází v alkoholickém prostředí vodního skla k rozkladu esteru, kdy se uvolňuje kyselina. V druhém stupni dochází vlivem uvolněné kyseliny k želatinaci vodního skla a ke vzniku pojivových gelů kyseliny křemičité. Mechanismus je podobný jako při reakci vodního skla s CO<sub>2</sub>. Za výhodu vodního skla s esterolem lze pokládat velmi dobrou rozpadavost vytvrzené směsi.

- c) **Olejová** jsou určena pro výrobu jader, pojivový systém je založen na vysušení pojiva při teplotě cca 250°C.
- d) **Sacharidy** (melasa, škrob, dextrin) jsou určeny pro výrobu jader, zajišťují dobrou pevnost po vysušení.

Pojiva II. generace, především pryskyřice se řadí mezi velmi plynotvorná pojiva. Také z ekologického a zdravotního hlediska jsou často méně příznivá. Naopak pojiva na bázi vodního skla jsou méně plynotvorná.

**Pojiva 3. generace** – je to spíše pojivový systém než samostatné pojivo. Využíváme fyzikálních účinků pojení. To je např. formování v magnetickém poli, zmrazování, formování ve vakuu. Tyto metody nejsou v běžné praxi tak rozšířeny, proto se jimi v této práci nezabývám.

### 2.1.3 Přísady

Jsou to látky ve formovací směsi, které zlepšují vlastnosti slévárenské formy. Např. zvyšují prodyšnost, rozpadavost, vyšší odolnost proti nejrozličnějším povrchovým vadám odlitků (např. zapečeninám). Typickou přísadou je např. kamenouhelná moučka (ledek), dále se používají např. dřevěné piliny. Dřevěné piliny po odlití vyhoří a ve formě vytvoří kanálky, čímž se zvýší prodyšnost a současně se umožní dilatace formy.

### 2.1.4 Voda

Voda se přidává především do směsí jílových nebo sádrových, cementových, atd. Voda v těchto směsích působí jako plastifikátor, tj. dává formovací směsi vlastnosti nutné k udržení tvaru po formování. Množství vody ve formovací směsi na bázi jílových pojiv bývá kolem 3 až 4 hmot. %, je základem pro formy syrové (nevysušené).

## 2.2 Mechanismus vzniku a vývinu plynů a par v pískových formách

[12]

Po odlití, kdy dojde ke styku taveniny kovu s lícem slévárenské formy, nastává sdílení tepla z taveniny do formy. V důsledku toho dochází k postupnému prohřívání jednotlivých vrstev formy. Rychlost prohřívání, resp. hloubka prohřívání formy na určitou teplotu  $T$ , závisí na teplotních podmínkách rozhraní tavenina – forma a na tepelně-fyzikálních vlastnostech formy (tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita,

součinitel přestupu tepla, hustota, atd.). Na základě zjednodušujících předpokladů, lze hloubku prohřátí formy  $H_F$  v určitém časovém okamžiku  $t$  a při určité teplotě  $T$  vypočítat dle vztahu:

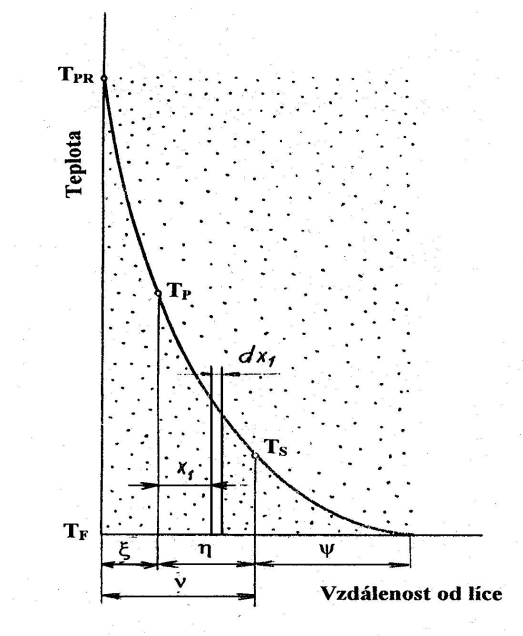
$$H_F = K_F \cdot \sqrt{t}, \quad (2.9)$$

kde značí:  $K_F$  – koeficient prohřátí formy [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$ ];

$H_F$  – hloubku prohřátí formy [m];

$t$  – dobu ohřevu formy [s].

V důsledku prohřátí, resp. vlivem tepelných a fyzikálních účinků ve formě, některé složky formovacích a jádrových směsí prodělávají významné fyzikálně-chemické přeměny, které doprovází uvolňování plynů (vypařování vody, vývin plynů při hoření přísad, rozklad vznikajících plynů, destilace pevných a kapalných látek, uvolňování vázané vody a ostatních kapalných látek i rozpínavost ohřátých plynů formy). Schopnost formovacích materiálů uvolňovat při ohřevu plyny a páry se nazývá plynatost. Teoretickým řešením tohoto problému se zabýval RYŽIKOV a SPASSKIJ [17]. Základem pro řešení je rozdělení formy dle význačné teploty na vrstvy:



Obr. 2-8 Rozložení teplot v pískové slévárenské formě s označením vrstev

1. vrstva  $\xi$  – je definována teplotním intervalem  $T_{PR}$  a  $T_P$  ( $T_{PR}$  – teplota na líci formy,  $T_P$  – teplota při které končí vylučování plynné fáze). Vývin plynů v této vrstvě je již ukončen.
2. vrstva  $\eta$  – je v teplotním rozmezí  $T_P$  až  $T_S$  ( $T_S$  – teplota, kdy dochází k vylučování plynů ve formě).
3. vrstva  $\psi$  – je popsána teplotním intervalem  $T_S$  až  $T_F$  ( $T_F$  – počáteční teplota formy). V této vrstvě nejsou potřebné teplotní podmínky a proto zde nedošlo k vylučování plynů.

Při řešení nás zajímá především množství uvolněných plynů k danému časovému okamžiku. To znamená uvolněné plyny z vrstev 1. a 2. Plyny z vrstvy 1. se již uvolnily a plyny z vrstvy 2. se vylučují. Oblast formy, která zahrnuje uvolnění plynů, je  $\xi + \eta$ . Ve vrstvě  $\xi$  se plyny již uvolnily a ve vrstvě  $\eta$  se právě uvolňují. K řešení lze využít Gaussova integrálu chyb. Množství uvolněných plynů z obou vrstev lze vypočítat:

$$Q = s \cdot \rho_F \cdot q_{TP} \cdot \sqrt{a} \cdot \left\{ \operatorname{erf}^{-1} \cdot \left[ \frac{(T_{PR} - T_P)}{(T_{PR} - T_F)} \right] + \operatorname{erf}^{-1} \cdot \left[ \frac{(T_{PR} - T_S)}{(T_{PR} - T_F)} \right] \right\} \cdot \sqrt{t} = A \cdot \sqrt{t}, \quad (2.10)$$

kde značí:  $s$  - procento pojiva ve formovací směsi;

$\rho_F$  - hustotu formy;

$q_{TP}$  - měrné množství vyloučených plynů při teplotě  $T_P$  (vztaž. k 1 % pojiva);

$a$  - střední teplotní vodivost formy;

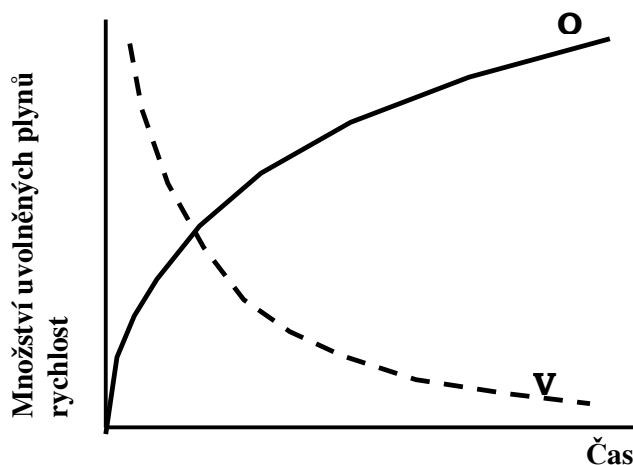
$A$  - součinitel plynotvornosti směsi;

$t$  - čas vývinu plynů.

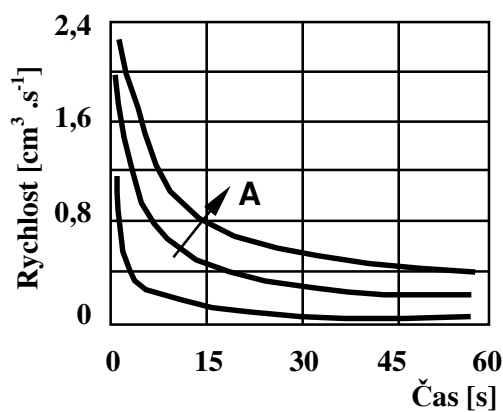
Rychlost uvolněných plynů lze vypočítat:

$$v = \frac{dQ}{dt} = \frac{A}{2\sqrt{t}}. \quad (2.11)$$

Na obr. 2-9 je uvedeno množství uvolněných plynů formy v závislosti na čase. Na obr. 2-10 je znázorněn vliv součinitele plynatosti směsi na rychlost uvolňování plynů. Vliv tloušťky stěny odlitku na množství vývinu plynů z formy je na obr. 2-11. Současně je zřejmé, že množství plynů uvolněných z formy je úměrné teplu, které forma přijala z tuhnutí odlitku.

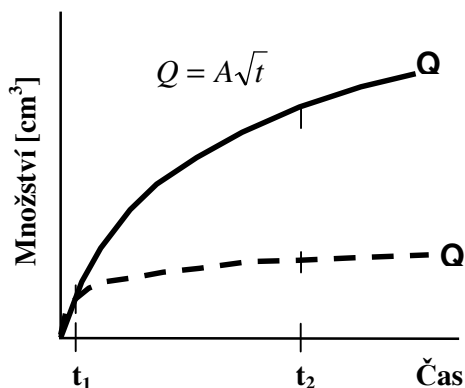


Obr. 2-9 Závislost množství uvolněných plynů na čase[12]



Obr. 2-10 Vliv součinitele plynatosti na rychlost vývinu plynů formy[12]





Obr. 2-11 Vliv tloušťky stěny odlitku na množství vývinu plynů formy [12]

### 2.2.1 Plynotvornost formovacích a jádrových směsí

[1]

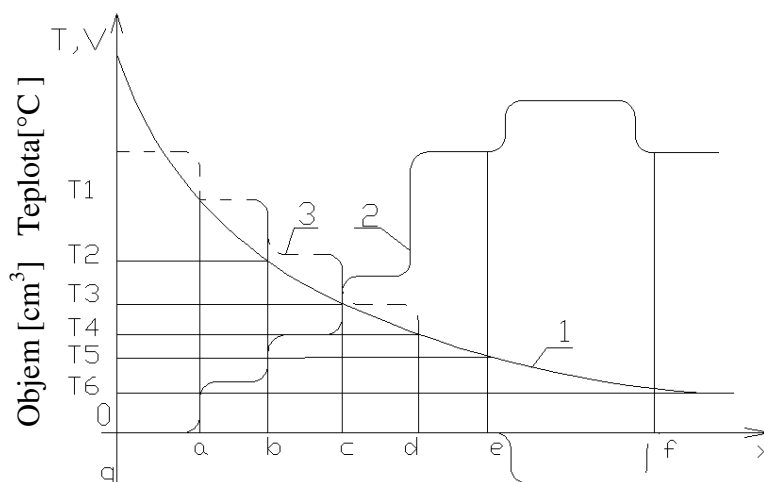
Plynotvornost je schopnost formovacích (jádrových) materiálů uvolňovat při ohřevu plyny a páry. Jsou to nežádoucí děje popisující dílčí chování těchto disperzních materiálů při vysokých teplotách krátce po zalití slévárenské formy a tudíž by měla hodnota plynatosti vykazovat co nejnížší hodnoty. V průběhu tuhnutí taveniny ve slévárenské formě se začínají prohřívat povrchové vrstvy. V pískové formě, která představuje porézní těleso, se vrstvy formy začnou postupně prohřívat od líce. Pokud tyto vrstvy dosáhnou kritické teploty (např. teplota vypařování vody, teplota rozkladu příslušné složky, atd.), dochází v těchto vrstvách k uvolňování plynů a par.

Plynotvornost vyjadřujeme v  $\text{cm}^3$  na 1g směsi, případně na  $\text{cm}^3$  směsi. Množství uvolňujících se plynů v pískové formě je dáno druhem pojiva a jeho podílu ve směsi, sklonem k navlhavosti směsi (způsobem sušení), zrnitostí ostřiva (prodyšností jader) a obsahem různých přísad určených k vyvolání vytvrzovacích reakcí či k cíleným technologickým požadavkům na samotná jádra. Škodlivý vliv těchto plyných produktů závisí na jejich množství, na prudkosti jejich vývinu a na jejich složení.

Kromě množství uvolněných plynů je důležitá i kinetika jejich vývoje ale i časový okamžik uvolnění v procesu tuhnutí kovu. Ze složek formovací směsi vykazují značnou plynatost voda a další kapalná rozpouštědla, některé minerály, pojiva, organické přísady a další látky.

Vznikající plyny tvoří směs, kde převládají redukční složky ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ). Jejich únik z místa vzniku do volné atmosféry se projevuje určitým tlakem. Ten je závislý na množství, rychlosti vývinu plynů a odporu kladeným formou. Při vysokých hodnotách tohoto tlaku v blízkosti líce formy může dojít k proniknutí plynů do taveniny v dutině formy a tím ke vzniku plynových bublin v odlitku.

Uvolňování plynů a par ve formách či v jádrech začíná na rozhraní formy a taveniny (na líci formy) a tato oblast vývinu plynů se posouvá hlouběji do formy, dle teploty ohřevu formy a dle teplot rozkladu jednotlivých složek směsi. Podrobnější popis průběhu uvolňování plynů v jednotlivých vrstvách formy (odpovídají určité teplotě  $T$ ) v čase  $t$  je uveden na obr. 2-12.



$x$  – vzdálenost od líce formy, 1 – průběh teploty ve formě v daném časovém okamžiku,  
2 – zbytková plynatost směsi, 3 – objem plynů uvolňujících se v jednotlivých vrstvách formy,  
0-q- přírůstek vlhkosti v kondenzační zóně

Obr. 2-12 Grafická závislost objemu plynů a teploty formy na vzdálenosti od jejího líce [1]

Z obrázku 2-12 je patrné, že po odlití se ve stěně formy vytváří několik vrstev s různým stupněm vývinu plynu. Tloušťka každé vrstvy v daném okamžiku je určena rozdělením teplot ve formě a hodnotami teplot rozkladu jednotlivých složek směsi. Nejprve se rozkládají komponenty s nejnižší teplotou rozkladu, postupně s vyšší teplotou rozkladu.

V zóně bezprostředně u odlitku, během krátkého času po odlití kovu, probíhá uvolnění veškerých plynů a par v důsledku prohřívání směsi. Za touto vrstvou

se nachází zóny rozkladu určitých látek. Tyto zóny začínají uvolněním chemicky vázané vody z bentonitu (u syrových forem) a minerálních příměsí, rozložením některých látek a končí vypařením mechanicky přimíšené vody (zóny 0-d). Poté následují zóny kondenzace plynů a par (e-f) a nakonec vrstva směsi, kde žádné změny nenastávají.

Hranice mezi vrstvami nejsou ostré (přechodné zóny), zejména v těch případech, kdy se složky rozkládají v intervalu teplot ( chemicky nestejnorodé látky ). Důsledkem vzniku těchto vrstev je ztráta počátečních stejnorodých vlastností slévárenské formy (jádra). Především mechanických a tepelně – fyzikálních vlastností.

Rychlost posunu zplyňování látek do nitra formy závisí na kritické teplotě rozkladu, tepelné vodivosti směsi a na teplotě rozhraní tavenina – forma. Se zvyšující se teplotou rozkladu látek se snižuje rychlost posunu zón.

Tabulka 2-1 Rozkladné teploty některých látek [5]

<b>Plynotvorný podíl ve směsi [hmot. %]</b>	<b>Kritické teploty rozkladu [°C]</b>
Voda	100
Jílové pojivo	200 až 400
Vápenec ( $\text{CaCO}_3$ )	860 až 910
Sulfitové pojivo	220 až 260
MF pryskyřice	280 až 320
FF pryskyřice	650 až 750

Tabulka 2-2 Orientační hodnocení různých procesů tvorby plynů procentuálně z celkového množství plynů při lití [5]

<b>Procentuální podíly z celkového obsahu uvolněných plynů [%]</b>			
<b>Procesy tvorby plynů</b>	<b>Syrové formy</b>	<b>Vysušené formy</b>	<b>Skořepinové formy</b>
Vypaření vody obsažené ve směsi	50 až 60	8 až 12	3 až 5
Spálení organických látek	2 až 3	5 až 8	2 až 10
Destilace organických látek	30 až 40	45 až 65	80 až 90
Uvolnění $\text{H}_2\text{O}$ z minerálů	0,5 až 8	15 až 25	0,5 až 2
Rozklad minerálních příměsí	1 až 5	1 až 5	1 až 2
Expanze vzduchu	do 0,5	do 1	do 0,5
Disociace plynů	6 až 9	8 až 12	10 až 15

Plynatost, jako vlastnost formovacích a jádrových směsí, se sleduje téměř od počátků rozvoje a uplatnění různých druhů směsí. Během vývoje byly navrženy různé metody měření. (viz kapitola 2.4- Metody stanovení plynatosti)

Mezi hlavní příčiny vzniku plynů ve formách se řadí procesy:

- a) tepelná roztažnost vzduchu v dutině formy a v pórech formovacích a jádrových směsí.
- b) vypařování volné vody a jiných kapalných látek (např. rozpouštědel) z formovacích směsí;
- c) dehydratace jílových pojiv ve formovací směsi;
- d) tepelná disociace vodní páry, vznikající vypařováním volné vody z formovacích směsí, nebo dehydratací jílových pojiv ve formovací směsi;
- e) tepelná disociace uvolňujících se plynů;
- f) suchá destilace a spalování organických látek, zejména pojiv;
- g) karbonizace a spalování uhlíkatých přísad (např. kamenouhelného prášku);
- h) spalování organických látek;
- i) destilace různých tuhých a kapalných organických látek;
- j) tepelný rozklad minerálů;
- k) rozklad uhličitánů (např. uhličitanu vápenatého).

### **2.2.2 Způsoby vzniku plynů formovacích a jádrových směsí**

[1]

#### **Vypařování vody a jiných rozpouštědel**

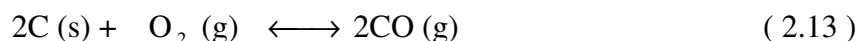
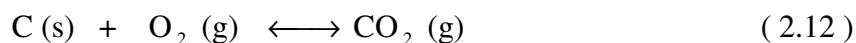
Vypařování vody se nejvíce projevuje u směsí obsahujících vodu jako rozpouštědlo pojiv (např. jílu v syrových pískových formách, kde je voda hlavním vypařujícím se elementem). Kromě vody může směs obsahovat i jiné vypařující se kapaliny. Voda obsažená ve formovacích směsích se nechová jako prostá mechanická přímíšenina. Navlhání směsí, ale i opačný proces, jako vysoušení, je provázen složitým komplexem fyzikálně – chemických jevů. Voda obsažená ve formovacích i jádrových směsích je s minerálními i organickými složkami směsi vázána:

- a) *chemicky* – voda je součástí krystalové mřížky minerálních složek směsi a vzniká při chemických reakcích a při vzniku krystalohydrátů. Lze ji uvolnit při poměrně vysokých teplotách, charakteristických pro daný materiál (minerál)
- b) *fyzikálně chemicky* – voda tvoří disperzní prostředí koloidních soustav pojiv (např. jílu, kde nastává vzájemné rozpouštění vody a látky). Dále tato vazba vzniká při adsorpčních procesech. K jejímu uvolnění je třeba přivést také značné množství tepelné energie.
- c) *mechanicky* – voda je ve směsích držena v důsledku snášivosti v kapilárách mezi jednotlivými částicemi směsi. Vazba je dána kapilárními silami a silami smáčení. Prvé záleží na povrchovém pnutí kapaliny a kapilárního tlaku a druhé jsou určeny charakterem a stavem povrchu kontaktujících se materiálů. Také odpařování takto vázané vody se odlišuje od procesu vypařování vody volně, mechanicky přimíšené, která se ve směsích také vyskytuje, ale která má např. od kapilární vody jiné vlastnosti.

### Spalování (hoření, oxidace) organických látek

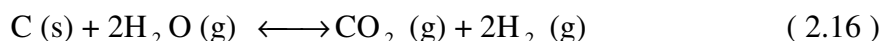
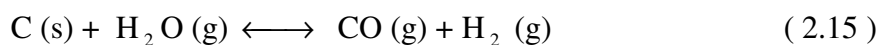
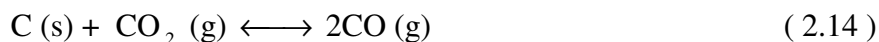
Ve směsích probíhá za přítomnosti oxidovadel ( vzdušný  $O_2$  obsažený v pórech jádra nebo přicházející kapilárami formy či jádra, dále vodní pára a  $CO_2$  ). Vzdušný  $O_2$  v pásmu hoření může prostupovat prostřednictvím difuze přes póry směsi a kromě toho vzduch je obsažen na začátku procesu v pórech. Ve skutečnosti jsou zdroje kyslíku omezené a nemohou zajišťovat intenzivní průběh oxidace organických látek. Průchod vzduchu přes póry formy po jejím naplnění tekutým kovem se prakticky zastavuje, protože vzniká velký vstřícný proud plynů, který směřuje od odlitků do atmosféry. Množství kyslíku v pórech, ve srovnání s množstvím vznikajících plynů, je malé.

*Významné jsou reakce oxidace tuhého uhlíku :*

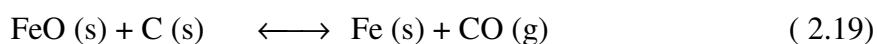
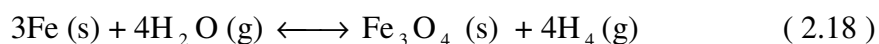
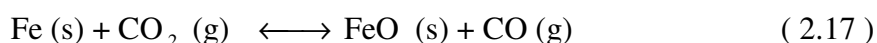


Větší praktický význam mají však reakce okysličování tuhého uhlíku vodními parami a  $CO_2$ . Oxidační reakce uhlíku oxidem uhličitým probíhá intenzivně při teplotách více než  $800^\circ C$ . Uhlík intenzivně reaguje i s parami vody při vysoké

teplotě, přičemž do 810°C (v hloubce formy) se přeměňuje v CO<sub>2</sub> a při vyšší teplotě (u povrchu formy) se přeměňuje v CO:



*Ve formách mohou probíhat i jiné reakce:*



Celkově je možno říci, že v pískových formách (jádrech) se vytváří a neustále obnovuje atmosféra složená z různých plynů a probíhá neúplné okysličení C na CO, jehož přítomnost ve velkých množstvích v atmosféře licí formy je experimentálně potvrzena. V případě volného přístupu vzduchu z formovacího materiálu ohřátém na vysokou teplotu organické látky úplně shoří s přednostním vznikem CO<sub>2</sub>.

### **Tepelný rozklad organických látek (destilace)**

Pomalý tepelný rozpad organických látek probíhá bez přístupu nebo s omezeným přístupem vzduchu (či jiného oxidovadla). Dochází k poruše struktury a k destilaci nejprve lehčích a po zvýšení teploty i těžších frakcí (nejprve se uvolňují těkavější frakce). Konečným produktem destilace je koks.

V licí formě se reakce liší od popsaného schématu tím, že se organické látky nacházejí v disperzním stavu, což vede při rychlém ohřevu licí formy k narušování pořadí uvolňování jednotlivých frakcí. V tomto případě vzniká jediná směs par a plynů, jejíž jednotlivé komponenty mají rozdílnou teplotu kondenzace. Chemické složení plynů při termickém rozpadu je charakteristické přítomností většího množství par H<sub>2</sub>O, olejů a nasycených a nenasycených uhlovodíků, dále je přítomen H, určité množství CO a CO<sub>2</sub> a jiné plynné či kapalné produkty.

Za nepřítomnosti O<sub>2</sub> v pórech směsi nedochází ke shoření produktů reakce. Během procesu filtrace kondenzuje část těchto produktů a zůstává ve směsi. Ta část, která nekondenzuje, uniká do atmosféry.

Destilace se významně uplatňuje při ohřevu směsí obsahujících větší množství organických pojiv ( syntetické pryskyřice, uhelná moučka). Tento zdroj je aktuální pro všechny jádrové a formovací směsi.

### **Tepelný rozklad minerálů**

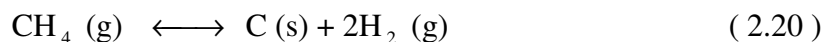
Probíhá při ohřevu některých minerálů obsažených ve směsi, přičemž se uvolňuje plynná složka (některé minerály mají vysokou plynatost, např. 1 kg  $\text{CaCO}_3$  uvolňuje  $0,224 \text{ m}^3$  plynu  $\text{CO}_2$ , viz rovnice 3.1 na straně 49).

*Součástí minerálů je i voda, která se v minerálech váže ve třech podobách:*

- *konstituční voda* – má nejpevnější vazbu s krystalickou mřížkou. Uvolňuje se při určité teplotě, obvykle při vypalování nebo při chemické reakci. Tento proces není vratný a minerál zbavený konstituční vody se rozpadá.
- *krystalizační voda* – má mnohem slabší vazbu než předchozí a uvolňuje se při žhání někdy ve dvou i třech tepelných intervalech. V mnohých případech se při namočení krystalizační voda opět naváže na minerál.
- *volně vázaná voda* – proniká do krystalické mřížky, ale není chemicky vázaná. Její vazba je daná délkou kontaktu vody s minerálem, teplotou, tlakem a jinými faktory.

### **Disociace plynů**

Může nastat u plynů uvolňujících se v důsledku některého z popsaných dějů. Nejčastěji se takto rozkládají při vysokých teplotách uhlovodíky a dochází přitom ke zvětšování objemu plynné fáze a k usazování uhlíku ve formě sazí v pórech směsi, jako např.:



Plyny mohou vstupovat do reakce jak mezi sebou, tak s látkami slitiny a formy (probíhají při současném zvětšování objemu, což se projevuje zvyšováním rychlosti úniku plynů z formy).

### **Rozpínání vzduchu**

Objem vzduchu a dalších plynů uzavřených v pórech mezi částicemi disperzní směsi činí asi 26 až 38 % objemu směsi (v závislosti na stupni zhuštění ). Při ohřevu

formy či jádra se objem tohoto plynu bude zvětšovat. Ve většině případů se však toto zvětšení objemu při ohřevu na teploty 500 až 700 °C bude podílet pouze malou částí na celkovém objemu uvolňujících se plynů a to jen velmi krátkou dobu ( pouze několik sekund po zaplnění formy taveninou). Vzduch uzavřený v dutině formy odchází převážně přes výfuky a v omezeném množství přes póry forem a jader.

Na základě výše uvedených chemických rovnic v této kapitole, byla ještě snaha o provedení informativních teoretických výpočtů stanovení množství vzniklého objemu plynů pro jednotlivé reakce. Ve skutečnosti je možné, že při zahřívání v jedné formovací směsi proběhne více různých reakcí, které přispívají k výslednému množství uvolněných plynů.

Tabulka 2-3 Výsledky výpočtů uvolněných plynů z uvedených reakcí

Typ reakce	Množství uvolněných plynů z 1 gramu složky
$C(s) + O_2(g) \longleftrightarrow CO_2(g)$	z 1g C(s) vznikne 1,866 dm <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> (g)
$2C(s) + O_2(g) \longleftrightarrow 2CO(g)$	z 1g C(s) vznikne 1,866 dm <sup>3</sup> CO(g)
$C(s) + CO_2(g) \longleftrightarrow 2CO(g)$	z 1g C(s) vznikne 3,73 dm <sup>3</sup> CO(g)
$C(s) + H_2O(g) \longleftrightarrow CO(g) + H_2(g)$	z 1g C(s) vznikne 3,73 dm <sup>3</sup> směsi plynů CO(g) a H <sub>2</sub> (g).
$C(s) + 2H_2O(g) \longleftrightarrow CO_2(g) + 2H_2(g)$	z 1g C(s) vznikne 5,598 dm <sup>3</sup> směsi plynů CO <sub>2</sub> (g) a H <sub>2</sub> (g).
$Fe(s) + CO_2(g) \longleftrightarrow FeO(s) + CO(g)$	z 1g Fe(s) vznikne 0,4 dm <sup>3</sup> CO(g)
$3Fe(s) + 4H_2O(g) \longleftrightarrow Fe_3O_4(s) + 4H_2(g)$	z 1g Fe(s) vznikne 0,534 dm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> (g)
$FeO(s) + C(s) \longleftrightarrow Fe(s) + CO(g)$	z 1g C(s) vznikne 1,866 dm <sup>3</sup> CO(g)
$CH_4(g) \longleftrightarrow C(s) + 2H_2(g)$	z 1dm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> (g) vznikne 2 dm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> (g)
$CaCO_3(s) \longleftrightarrow CaO(s) + CO_2(g)$	z 1g CaCO <sub>3</sub> (s) vznikne 0,224 dm <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> (g)

**Poznámka:** U výpočtů vzniku plynů z těchto chemických rovnic je výpočet proveden s tím, že proběhne kvantitativně beze zbytku, tzn. že vše proběhne 100%, pro přesnější výpočet je ještě možné počítat s ustálením tzv. dynamické rovnováhy, což pro naše potřeby není nutné.

V příloze č.4 jsou uvedeny potřebné hodnoty a vzorce pro výpočet těchto hodnot spolu s provedenými výpočty uvolněných plynů. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 2-3.



### 2.2.3 Popis vzniku a pronikání plynu z formy nebo jádra do taveniny

Ve slévárenské praxi je nutné, aby se plyny z formy neuvolňovaly do dutiny formy, resp. do taveniny. Při nevhodných energetických a tlakových podmínkách na rozhraní kov - forma mohou plyny často pronikat do taveniny a naopak. Plyny z formy do taveniny mohou vniknout dle této rovnice:

$$p_F = p_m + p_p + p_{pf} \quad (2.21)$$

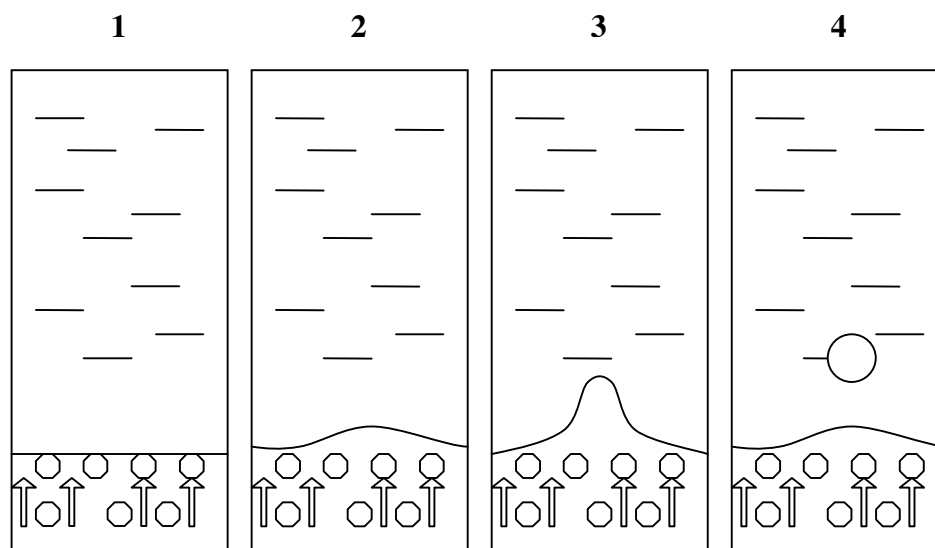
kde značí:  $p_F$  - tlak plynů ve formě;

$p_m$  - metalostatický tlak;

$p_p$  - odpor kovu proti vniknutí plynové bubliny do taveniny;

$p_{pf}$  - přetlak plynů nad hladinou roztaveného kovu.

Největší rychlost vývinu plynů nastává v okamžiku styku roztaveného kovu s formou, popř. s jádrem, při počátku lití, kdy je malá tloušťka ztuhlého kovu a malý metalostatický tlak. Na obr. 2-13 je uveden časový vývoj plynové bubliny uvolňované z formovací směsi do tekutého kovu. V prvním okamžiku po odlití se začnou uvolněné plyny shromažďovat na hranici formy a taveniny, ale zatím nepronikají do taveniny (viz detail 1 na obr. 2-13). V důsledku toho, že tlak plynů ve formě neustále vzrůstá, expanze plynů do taveniny je velmi výrazná, čímž tlak plynů formy začne překonávat odpor kovu proti vniknutí plynové bubliny do taveniny (viz detaily 2,3 na obr. 2-13). Dalším zvýšením tlaku se bublina, která se dosud stále držela při hranici formy a taveniny, vlivem povrchových napětí, zaškrtní a uvolní se do taveniny (viz detail 4 na obr. 2-13). Uvolnění nastane při překonání metalostatického tlaku. Tento mechanismus se opakuje do doby, než skončí chemické změny ve formě a tím se již nezvyšuje tlak na taveninu.



Obr. 2-13 Schématické naznačení vniknutí plynu do taveniny ( $p_F \geq p_m + p_p + p_{pf}$ ) [7]

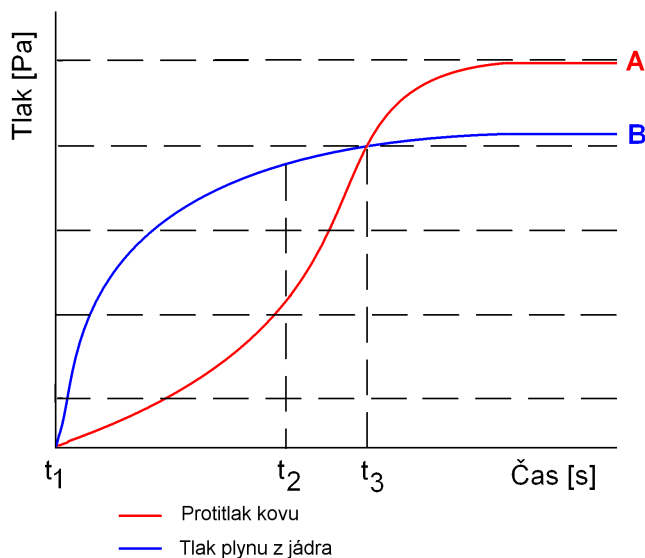
Plynatost směsí není jen jedna dílčí vlastnost směsi, ale je nutné ji posoudit s ostatními podmínkami, např. prodyšností směsí, styčnou plochu jádra s kovem, průřezem známek, metalostatickým tlakem atd. Přetlak plynů je funkční závislostí těchto veličin (obsah a druh spalitelných látek, styčná plocha kovu s jádrem, objem jádra, průřez známek, odvzdušnění, prodyšnost směsi).

Aby plyny pronikaly kovem, musí být jejich tlak v daném okamžiku větší, než je tlak kovu. Vývoj plynů v jádře je nejintenzivnější v prvních okamžicích po odlití formy a proto je vznik vad způsobených plynem v prvních sekundách nejpravděpodobnější.

Tlak plynů v jádře závisí i na geometrických charakteristikách jádra, např. na velikosti plochy styku mezi jádrem a kovem, dále na délce dráhy filtrace plynu v jádru (zkrátíme-li délku dráhy plynů, silně poklesne tlak plynů).

Pokud sledujeme tlakové poměry při vzniku vad odlitků v důsledku vývinu plynů v závislosti na čase, lze konstatovat, že velký význam sehraává tlak taveniny působící proti přetlaku plynů jádra nebo formy, viz obr. 2-14. Na tomto obrázku křivka A znázorňuje časový průběh protitlaku taveniny a křivka B časový vývin tlaku plynů formy včetně jádra. Z tohoto obrázku je zřejmé, že v prvních okamžicích po odlití

(např. v čase  $t_2$ ) vzniká velký vývin plynů, nejen z formovací směsi, ale také např. při použití pravého jádra. Pravé jádro se obzvláště velmi rychle prohřívá vlivem tepla obklopenou taveninou. Protože dutina formy je v prvních okamžicích pomalu zaplňována taveninou, vykazuje malý tlak proti působícímu tlaku plynů uvolňovaných formou. Teprve po určité době (např.  $t_3$ ), dojde k vyrovnání tlaků a pak začne ustávat uvolňování plynů z formy a tlak kovu, resp. taveniny začne převládat. V tomto okamžiku již není nebezpečí vzniku plynových bublin v odlitku.



Obr. 2-14 Tlakové poměry při vzniku plynových vad [16]

#### 2.2.4 Činitelé způsobující plynové vady v odlitku

Na vzniku plynových bublin v odlitku se podílí více činitelů, které se uplatňují současně. Je to volba formovacího materiálu (druh pojiva, jeho množství, navlhavost, zrnitost, způsob sušení a prodyšnost), volba druhu jader a v neposlední řadě má na výskyt bublin také vliv účinku kovu (kinetika vývoje plynu, metalostatický tlak, vazkost kovu a rychlost lití).

Z výčtu činitelů vyplývá, že na odstranění negativního účinku plynů z forem, nebo k jeho snížení, můžeme použít tyto tři hlavní metody: volba vhodného pojiva a jeho optimálního množství, regulace prodyšnosti a vhodný odvod plynů a vhodné řízení sušení jader.

## 2.3 Metody sledování plynatosti

[2]

Metody sledování plynatosti lze rozdělit do dvou hlavních skupin, tj. podle toho, zdali laboratorně napodobujeme tepelné namáhání na vzorku jádrové nebo formovací směsi, nebo zdali přímo sledujeme množství uvolněných plynů, které vzniká zalitím jádra definovaného tvaru taveninou o zvolené teplotě. Pak se tyto metody dělí:

A) nepřímé – laboratorní;

B) přímé – provozní,

Pro posouzení jakosti formovací nebo jádrové směsi nestačí znát jen velikost objemu uvolněných plynů, ale také čas nutný k jejich vývinu. Teprve posouzením obou veličin plynatvornosti a času je možno posoudit kvalitu směsi. Je obecně známo, že plyny jsou v odlitku nebezpečné pouze do doby, než se vytvoří dostatečně pevná licí kůra odlitku, těsně po odlití, která již brání vniknutí plynů z formy do taveniny a tím ke vzniku vadného odlitku.

Identifikaci množství plynu v závislosti na čase lze provést také dvěma způsoby:

- 1) registrací změny tlaku v závislosti na čase;
- 2) registrací změny objemu v závislosti na čase.

Existuje celá řada metod zjišťování plynatosti směsí, doposud nedošlo ke sjednocení podmínek sledování plynatosti (liší se např. použitou teplotou ohřevu), takže nelze srovnávat hodnoty plynatosti získaných různými zkouškami. Proto je možno porovnávat pouze hodnoty získané stejnou metodou. U některých metod nesledujeme celý průběh vývinu plynů, ale zaměřujeme se pouze na maximální hodnoty (tlaku nebo objemu uvolněných plynů) v příslušném časovém okamžiku. Obecně lze při sledování plynatvornosti aplikovat tyto možnosti:

- a) zahřívání malých vzorků písku na lodičce v laboratorní trubkové peci. Měření vzniklých plynů s vyloučením kondenzátu.
- b) měření plynů vzniklých ze zalitých pokusných jader, a to s vyloučením kondenzátu.
- c) měření tlaku plynů a par, vzniklých v pokusném jádru zalitém nebo ponořeném do roztaveného kovu.
- d) měření proudových rychlostí (a tedy i množství plynů a par) v jádru, zalitém nebo ponořeném do roztaveného kovu.

### 2.3.1 Metody přímé – provozní

Přímé metody jsou založeny na použití buď formy a nebo jádra zkoumaného odlitku, popř. speciálně upraveného vzorku jader nebo forem. Směs je napěchována a její ohřev je proveden přímo – tekutým kovem. Velikost objemu vzniklých plynů je sledována tlakoměry nebo plynoměry různých principů a konstrukcí. S poklesem teploty taveniny klesá též intenzita prohřívání směsi. Průběh tlaku se blíží skutečnému průběhu vývinu plynů. Množství plynů se tedy obvykle měří v závislosti na tlaku plynů. Objem uvolňujících se plynů nebo rychlost tvorby plynů je závislý na čase. Pro jakostní charakteristiky se používají součinitelé charakterizující mechanismus plynatvornosti ve formě. Sledované směsi se kolísavě ohřívají vlivem nedokonalého kontaktu s tekutým kovem, což nám umožňuje experimentálně získat vlastnosti reálných odlitků a forem. Existuje několik druhů přímých metod sledování plynatosti směsí, které se od sebe liší druhem formy, rozměry vzorků, zaformováním vzorku atd. Tato metoda umožňuje získat lepší představu o chování formy nebo jádra při odlévání a tunutí kovu, než u metody nepřímé.

1. Metoda podle Spasského – směs je zaformována v keramické prstenci. Odvod plynů z jeho středu je pomocí křemenné trubice, která ústí do speciální, hermeticky uzavřené nádoby o vnitřním objemu  $19\,300\text{ cm}^3$  a je opatřena speciálním tlakoměrem. Tlakoměr je vlastně membrána z tenkého plechu. Na ni jsou připojeny tenzometry snímající její průhyb. Objem uvolněných plynů se vypočítá ze znalosti tlaku a vnitřního objemu nádoby.
2. Metoda podle Berga - vzorek je kruhového průřezu  $\varnothing 150\text{ mm}$  s pracovním povrchem  $176\text{ cm}^2$ . Tloušťka vzorku je cca do 50 mm. Vzorek je vložen do speciálního prstence a zalévá se taveninou až do výše 80 mm. Měří se objem a teplota uvolněných plynů.
3. Metoda podle Jašina – směs je zaformována do speciálního tvaru. Takto připravený vzorek je vložen do kovové formy tak, že roztavený kov přitéká na spodní část vzorku. Po zalití kovem se prstenec uvolní a směs se rozpadá. Podle míry rozpadnutí lze usuzovat míru plynatvornosti. Výsledný objem se stanovuje z empirických vztahů.
4. Metoda podle Piščeva – plyny jsou odváděny ze vzorku umístěného ve středu kovové formy pomocí trubky, která je napojena na měřicí přístroj tlaku a objemu. Hodnoty jsou odečítány v předem stanovených časových intervalech. Vzorek je možno

zalévat dvěma způsoby. Jeden způsob je vhodný pro směsi, které budou při výrobě odlitku zalité pouze z jedné strany, proto je také vzorek zalit jen z části. Druhý způsob je vhodný pro jádra s velkým tepelným namáháním. V tomto případě je vzorek zaléván celý.

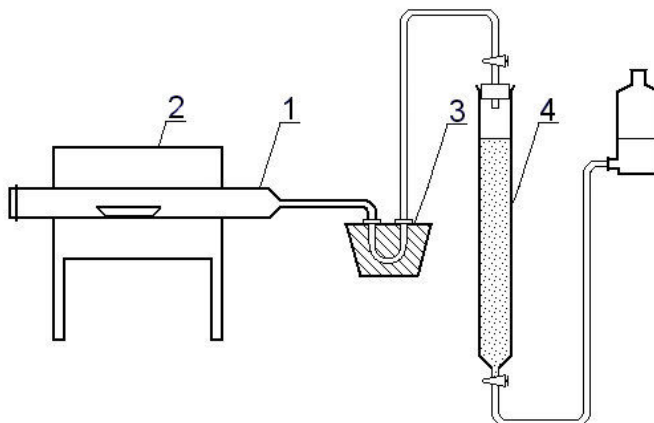
5. Ponorná zkouška – jde o metodu, při které se měří tlak plynu v jádře v závislosti na čase. Výsledná závislost vykazuje dvě maximální hodnoty. První z těchto hodnot vznikne na počátku, kdy se k vytváření plynů z jádrové směsi přidá ještě objem plynů obsažený v pórech formy a prudkým ohřevem zvětšují svůj objem. Vznikající plyny jsou částečně odváděny trubičkou. Zbytek proniká roztaveným kovem. Pára a kondenzující plyny se srážejí v kondenzační zóně, která se v průběhu prohřívání jádra posouvá směrem k jeho středu. Ke druhé maximální hodnotě dojde až se kondenzační zóna přemístí do středu vzorku k trubičce, kde se kondenzát vypaří.

Na tuto zkoušku je formovací směs připravena podle předem stanovených postupů a směs je slisována s trubičkou přesným tlakem. Pro samotné provedení zkoušky je zhotoveno zvláštní mechanické zařízení, skládající se ze vzduchového válce, ramene a ukazatele přesné polohy. Přívod tlakového vzduchu je škrcen clonou zaručující konstantní rychlost ponořování do hloubky 200 mm. Vzorek je ponořován do taveniny umístěné v kelímku o obsahu  $0,0078 \text{ m}^3$ . Ohřev je prováděn indukčně.

### 2.3.2 Metody nepřímé - laboratorní

Metody nepřímé (laboratorní) jsou založeny na sledování plynatosti malého množství formovací nebo jádrové směsi, kterou zahříváme v peci. K tomuto účelu slouží např. Marsova pec, do které prostřednictvím porcelánové lodičky vkládáme navážku malého množství sledované směsi. Zde je směs zahřívána a vzniklé plyny proudí chladičem do různě sestaveného eudiometru (skleněná kalibrovaná trubice pro měření objemu plynů), viz schéma na obr. 2-15.

Tohoto a podobného pokusného uspořádání použili ve 30. a 40. letech minulého století např. K. GRASSMANN, W. H. DIETERT, A. A. NIZOVCEV a jiní, jak uvádí PETRŽALA [2]. Určitá chyba nastávala tím, že z měření se vyloučily kondensáty, které v kritickém okamžiku působí v jádru jako plyny. Výsledky těchto metod byly relativní, neboť nebylo jasné, zda vyjadřují skutečné poměry ve formě nebo jádru.



1- žáruvzdorná trubice se vzorkem směsi; 2- Marsova pec; 3 – chladič; 4 - eudioměr

Obr. 2-15 Schéma přístroje na stanovení plynatosti formovací směsi [2]

Od této doby došlo ke zpřesnění nepřímých metod zjišťování plynatosti. Také byla zkonstruována a jsou profesně vyráběna zařízení k měření plynatosti. Postupně byly vyvinuty metody při kterých zahříváme rozmělněnou navážku zkoumané směsi v peci na zvolenou teplotu (600 až 1300 °C). K měření se používá tzv. vlastní atmosféry (měřicí aparatura je vyplněna plyny, které vznikají při měření), popř. je možné do měřicího zařízení přivést netečný plyn. Různé druhy atmosfér se používají proto, abychom zaručili stálost případných vlivů a vyloučili možnost hoření za přítomnosti vzdušného kyslíku nebo atmosféry CO<sub>2</sub>. K tomu přispěla např. firma George Fischer (+GF+) přístrojem PGD, který je v současné době používán ve velkých slévárnách. Je konstruován pro teplotu ohřevu vzorku 800 až 1000 °C, v atmosféře N<sub>2</sub>. Skládá se z pecního prostoru a vstřelovacího zařízení. Navážka má hmotnost 1 gramu a přístroj má vodní manometr, který sleduje tlak plynů a se vstřelením vzorku do pece i čas.

Dále se používá např. metoda podle Ornsta, kdy se vzorek vkládá pomocí speciálně upravené lodičky do trubkové elektrické pece vyhřáté na 1000°C. Přitom se měří tlak pomocí dvou zvláště sestavených manometrů. Po každém měření je zařízení profukováno CO<sub>2</sub>.

Dále je to metoda Ströhlein, kdy se vzorek vkládá do Marsovy pece vyhřáté na teplotu 1250°C. Měří se čas a množství vyvinutého plynu. Množství plynu se odečítá na kalibrované byretě, z níž je kapalina plyny vytlačována do vyrovnávací nádržky. Odečítaný objem nesouhlasí se skutečným uvolněným objemem, protože tlak není konstantní, ale lineárně narůstá s poklesem hladiny. Maximální hodnota plynatosti

je odečítána při maximální komprimaci. Navážka směsi činí cca 2g, je tedy nutné pro vyhodnocení přepočítat na 1 g směsi.

Metoda podle SVÚM Brno vychází ze stejného uspořádání měřícího zařízení jako metoda podle Ornsta. Rozdíl spočívá v odečítání maximální hodnoty ne z manometru, ale z reometru, kterým je v zapojení manometr nahrazen. Navážkou je směs o hmotnosti 1 g.

Obecně lze konstatovat, že nepřímé metody používají navážky 1 až 5 gramů směsi, která se umístí do porcelánové lodičky a směs se nepěchuje, naopak povrch je nakypřený. Pouze ve zvláštních případech se používají speciální vzorky z pěchované směsi. Ohřev se provádí v elektrické peci při teplotě 800 až 1300 °C pomocí tepelného záření. Výkon tepelného zdroje je stálý během celého pokusu. Metody měření množství uvolněného plynu jsou závislé na tlaku nebo na objemu. U této metody lze plynotvornost určit buď měřením tlaku vznikajících plynů v závislosti na čase nebo měřením objemu vznikajících plynů též v závislosti na čase. Objem uvolněných plynů není časově závislý. Pro jakostní charakteristiky se používá fyzikálně definovaných podmínek prohřívání směsi v licí formě a kinetiky plynotvornosti. Tak jako metody přímé, též nepřímé metody se vyznačují následujícími nedostatky. Měření nepostihuje vliv relativní tloušťky stěny odlitku ani vliv tloušťky stěny jádra oblitého kovem. Vzorek je prohříván při konstantní teplotě, přičemž v praktických podmínkách je teplota prohřátí jádra různá. Žádné z těchto měření nemůže ukázat celkový akční tlak plynů z jádra v přímé souvislosti se stavem tuhnutí, neboli nepostihuje skutečné tepelné poměry v jádře.



### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

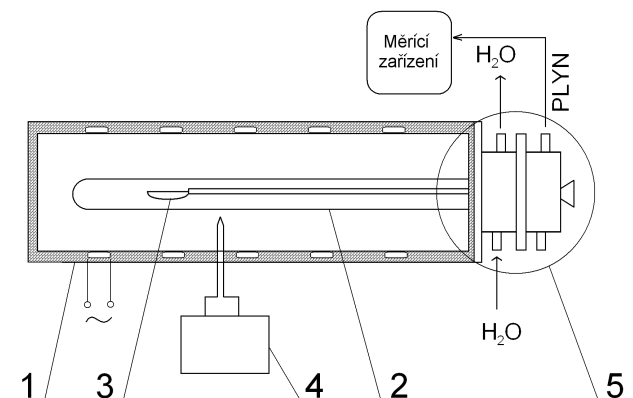
Experimenty této diplomové práce byly zaměřeny na sledování plynatosti vybraných typů formovacích směsí, resp. jádrových směsí. Měření plynatosti bylo provedeno na měřicím zařízení, které bylo navrženo a sestrojeno na našem pracovišti – Katedře strojírenské technologie – FS, TU v Liberci, jak je uvedeno též v úvodu této práce.

#### 3.1 Charakteristika měřicího zařízení

Měřicí zařízení plynatosti používané na našem pracovišti prošlo již dvacetiletým vývojem a je neustále zdokonalováno. Principem je snímání tlaku uvolňujících se plynů spalováním vzorku směsi v elektrické peci. Tato metoda vychází z metodiky měření plynatosti na přístroji PGD (firma +GF+), tzn., že se v uzavřeném prostoru pece, který je spojen pouze s měřicí soustavou, ohřívá sálavým teplem vzorek zkoušené formovací nebo jádrové směsi. Na měřicím zařízení sledujeme tlak uvolňujících se plynů v daném časovém okamžiku. Funkce navrženého zařízení bylo již podrobně ověřeno a některé výsledky zpracovány v diplomových pracích BAUEROVÁ [11], NOVÁK [15], JENČOVSKÝ [16]. Avšak od té doby prošlo zařízení i několika konstrukčními i metodickými změnami.

Toto měřicí zařízení pro měření plynatosti slévárenských formovacích a jádrových směsí pracuje na principu snímání tlaku uvolňujících se plynů při zahřívání směsí. Skupinové schéma zařízení je uvedeno na obr. 3-1.

Měřicí zařízení pracuje s tímto postupem: Vzorek směsi o hmotnosti  $1,00 \pm 0,01$  g se ohřívá v otevřené lodičce z molybdenového plechu, což umožňuje jeho velmi rychlý ohřev již od prvních okamžiků po vložení vzorku do prostoru zatavené křemenné trubice, která je umístěná v elektrické odporové trubkové peci.



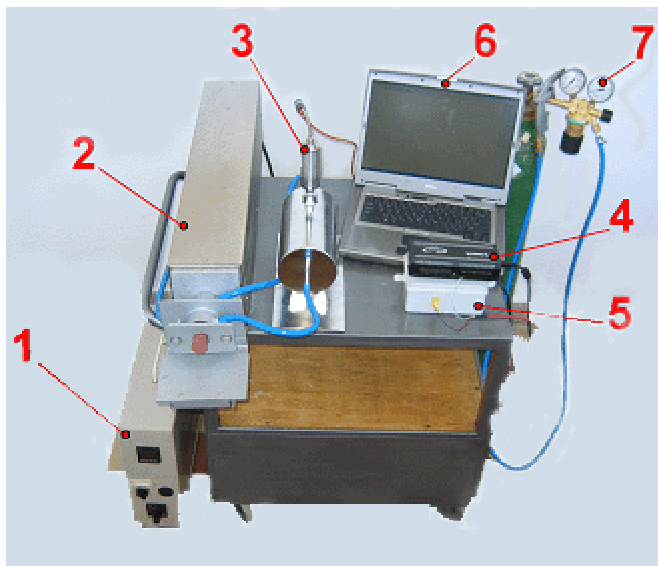
1- elektrická odporová pec; 2 - křemenná zatavená trubice;  
3 - lodička z molybdenového plechu; 4 - regulátor pece; 5 – uzavírací hlavice pece s  
chlazením

Obr. 3-1 Skupinové schéma měřicího zařízení plynatosti [14]

Zařízení umožňuje měření plynatosti při teplotách do 1300 °C. Výše teploty má vliv i na vyšší rychlost ohřevu vzorku v lodičce. Měřicí zařízení současné konstrukce je koncipováno na základě uplatnění moderních snímačů tlaků a teploty, pomocí sběrnice dat a následného vyhodnocení digitálního signálu a jeho zobrazení pomocí PC. Na obr. 3-2 je uvedeno používané měřicí zařízení.

Při manipulaci s měřicím zařízením je nutno provést náležitosti nutné ke správnému chodu a přesnosti měření. To je např. kontrola těsnosti a spojení propojovacích hadic. Kontrola činnosti a nastavení teplotního a tlakového čidla. Spuštění cirkulace chladicího okruhu uzavírací hlavice pece. Správné nastavení datových vstupů, jednotek a rozsahů na programu DaqView (viz popis programu v příloze číslo 2).

Po ukončení měření je nutné po vypnutí všech elektrických zařízení také ještě ponechat spuštěný chladicí okruh uzavírací hlavice měřicího zařízení. Ten je možný vypnout až po vychladnutí pece, kvůli bezpečnosti a zároveň kvůli menšímu namáhání a delší životnosti uzavírací hlavice.



1- regulátor pece; 2 – Marsova pec; 3 – tlakové čidlo; 4 – sběrnice dat; 5 – zdroj napětí pro sběrnici; 6 – PC; 7- tlaková nádoba s plynem ( $N_2$ )

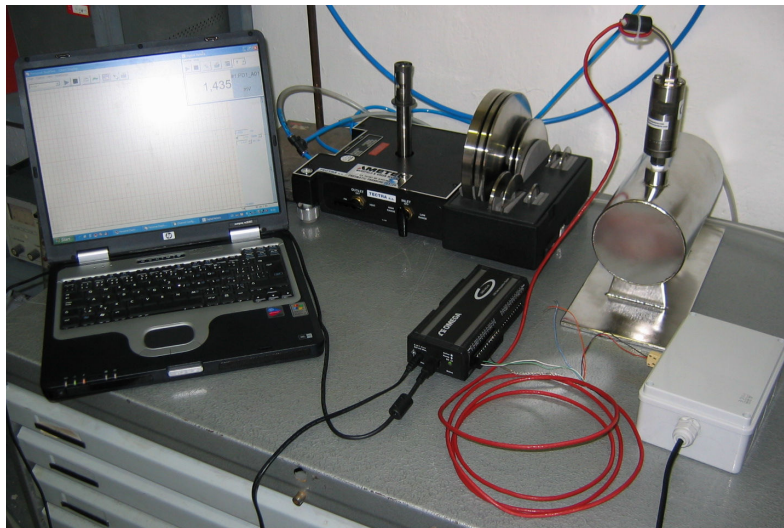
Obr. 3-2 Pohled na komplexně zmodernizované měřicí zařízení plynatosti formovacích a jádrových směsí

### 3.1.1 Kalibrace zařízení

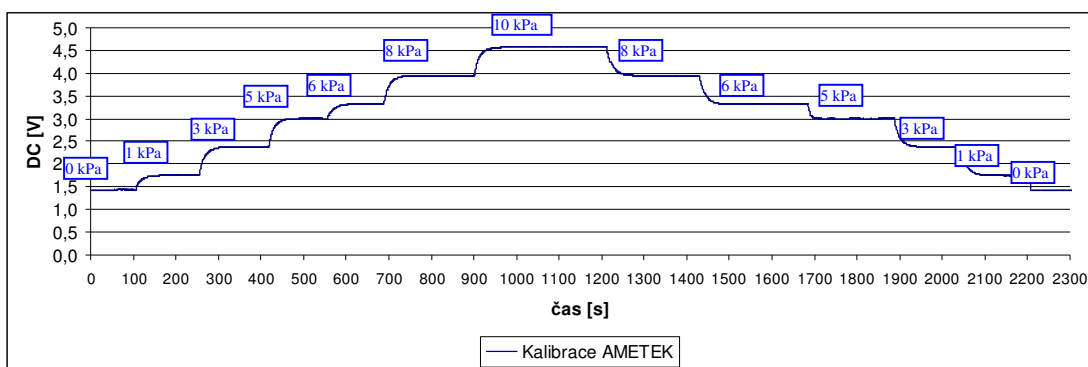
Před každou sérií prováděných experimentů je vhodné provést kalibraci měřicího zařízení.

V této souvislosti je třeba konstatovat, že před použitím nově zrekonstruovaného měřicího zařízení plynatosti (viz obr. 3.2) byla provedena jeho kalibrace pomocí zátěžové pumpy AMETEK, viz obr.3-3. Tato pumpa je k dispozici na Katedře energetických zařízení na TU v Liberci. Změna vstupního tlaku se provádí (pomocí kalibračních závaží, působících na danou plochu) v rozsahu 1 až 10 kPa. Výstupní kalibrační křivka je závislost tohoto tlaku na změřeném napětí sledované soustavy (měřicí zařízení plynatosti). Výstupní hodnoty napětí jsou zobrazeny softwarem daqView. Pro kontrolu správnosti výstupní hodnoty napětí, byl do soustavy zapojen i digitální multimetr. Záznamy změn výstupního napětí při prováděné kalibraci jsou zobrazeny na obr. 3-4. Na základě záznamu kalibrace čidla pomocí kalibrační zátěžové pumpy (AMETEK) byla sestrojena kalibrační křivka výstupního napětí při změně tlaku, viz obr.3-5. Ze získaných hodnot naměřených na zátěžové pumpě byly stanoveny

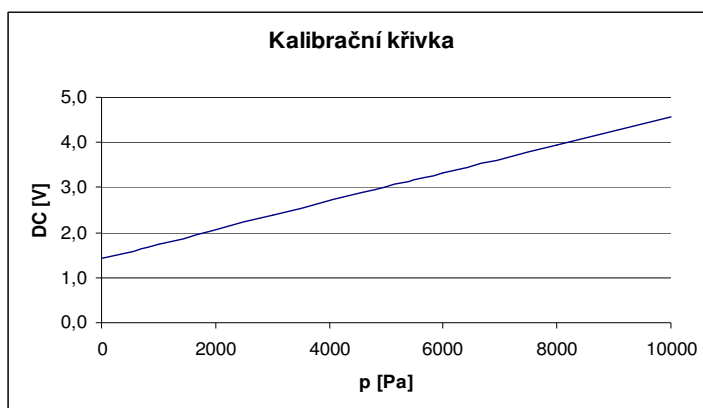
kalibrační konstanty pro rozmezí tlaků 0 až 10 000 Pa, viz tabulka 3-1. Tedy pro rozsah tlaků do 1000 Pa odpovídá konstanta, kdy  $1\text{ Pa} = 0,00030300\text{ V}$ . S hodnotou této konstanty byly provedeny výpočty plynatosti v této diplomové práci.



Obr. 3-3 Kalibrace snímače pomocí zátěžové pumpy AMETEK [16]



Obr. 3-4 Záznam kalibrace čidla pomocí zátěžové pumpy AMETEK



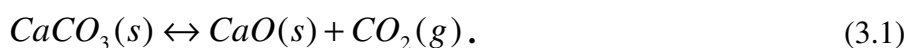
Obr. 3-5 Kalibrační křivka zjištěná pomocí zátěžové pumpy AMETEK

Tabulka 3-1 Zjištěné kalibrační konstanty pro dané tlaky pomocí zátěžové pumpy AMETEK

Tlaky zátěžové pumpy [Pa]	Hodnoty změřených napětí [V]	Přepočtení konstanty [ Pa.V <sup>-1</sup> ]
<b>1000</b>	1,74300	0,00030300
<b>3000</b>	2,37700	0,00031700
<b>5000</b>	3,00600	0,00031450
<b>6000</b>	3,31800	0,00031200
<b>8000</b>	3,94600	0,00031400
<b>10000</b>	4,57200	0,00031300
<b>Průměrná konstanta:</b>		<b>0,0003125</b>

Vzhledem k tomu, že měření plynatosti našich vzorků jádrových směsí je vyvolána malá změna tlaku a tímto se pohybujeme v malém rozsahu kalibrační křivky stanovené pomocí zátěžové pumpy (AMETEK), bylo vhodné ještě pro kontrolu provést kalibraci pomocí metody rozkladu  $\text{CaCO}_3$  (tato metoda je používána pro kalibraci profesně používaných měřicích zařízení plynatosti). Pro nás tato metoda lépe vystihuje místní podmínky, tedy malé změny tlaku měřené plynatosti, a k tomu odpovídající změny objemu.

Kalibrace zařízení byla provedena na základě tepelného rozkladu čistého uhličitanu vápenatého ( $\text{CaCO}_3$ ), který se rozkládá při teplotách 850 až 894 °C podle rovnice:



$\text{CaCO}_3$  patří mezi tuhé alkalické zeminy a nachází se v přírodě ve dvou modifikacích, jako vápenec a jako aragonit. Pro uplatnění kalibrační látky ( $\text{CaCO}_3$ ) bylo nutno určit objem uvolněných plynů z rozkládajícího se zkušební vzorku čistého  $\text{CaCO}_3$ . Objem uvolněných plynů ze zkušební vzorku byl teoreticky stanoven z rozkladné rovnice  $\text{CaCO}_3$  podle vzorce:

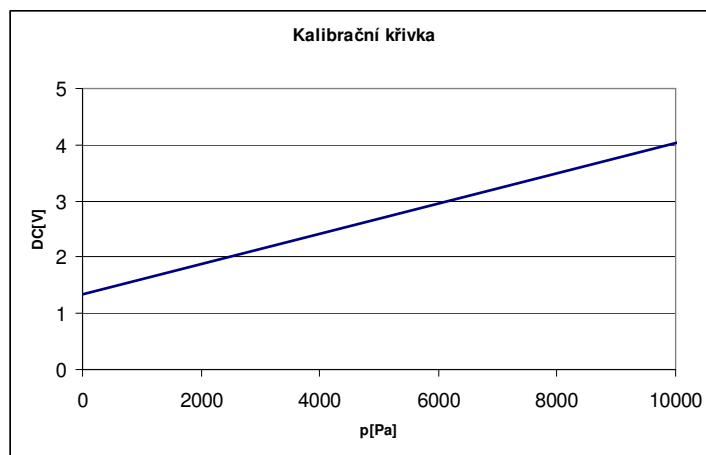
$$V = \frac{(V_m \cdot m)}{(M_{\text{CaCO}_3})}, \quad (3.2)$$

kde značí:  $V_m$  – molový objem plynu;

$m$  – hmotnost  $\text{CaCO}_3$ ;

$M_{\text{CaCO}_3}$  – molární hmot.  $\text{CaCO}_3$ , pro 0,1 g navážky  $\text{CaCO}_3$ :  $V = 22,4 \text{ cm}^3$ .

Na obr. 3-6 je uvedena kalibrační křivka daného měřicího zařízení zjištěná pomocí tepelného rozkladu vápence ( $\text{CaCO}_3$ ).



Obr. 3-6 Kalibrační křivka zjištěná pomocí rozkladu  $\text{CaCO}_3$

Zjištěné hodnoty tepelného rozkladu  $\text{CaCO}_3$  jsou uvedeny v tabulce 3-2.

Tabulka 3-2 Zjištěné kalibrační konstanty pro dané tlaky pomocí  $\text{CaCO}_3$ 

Hmotnost $\text{CaCO}_3$ [g]	Teoretický objem [ $\text{cm}^3$ ]	Průměrné hodnoty změřených napětí [V]	Tlak uvolněných plynů [Pa]	Přepočtení konstanty [ $\text{Pa} \cdot \text{V}^{-1}$ ]
<b>0,05</b>	11,2	1,503162	544,5614035	0,000335043
<b>0,1</b>	22,4	1,681216	1089,1228	0,000334017
<b>0,15</b>	33,6	1,744144	1633,68421	0,000263725
<b>Průměrná konstanta:</b>				<b>0,000310928</b>

Porovnáním hodnot průměrných výsledných konstant z obou těchto kalibrací bylo zjištěno, že hodnoty kalibrace na zátěžové pumpě AMETEK (průměrná hodnota konstanty je 0,0003125) jsou téměř shodné s kalibrací pomocí rozkladu  $\text{CaCO}_3$  (průměrná hodnota konstanty je 0,000310928). To ukázalo správnost obou kalibrací. Vyskytují se však drobné odchylky při porovnání jednotlivých tlaků a k nim odpovídajících konstant. To může být způsobeno jednak tím, že vzhledem k odlišným typům kalibrace nemůžeme porovnávat vždy přesně shodné tlaky a také tím, že u kalibrace pomocí rozkladu  $\text{CaCO}_3$  využíváme teoretického výpočtu objemu, který se může od reálného objemu trochu lišit.

Po kalibraci je možné již provést vlastní měření plynatosti směsí.

Měřený výsledný objem uvolněných plynů při zkoušce plynatosti směsi pomocí měřicího zařízení lze vypočítat na základě izotermických podmínek ( $T = \text{konst.}$ ) ze vztahu:

$$p \cdot v = \text{konst.} \quad (3.3)$$

Pro podmínky měřicího zařízení je možno vztah (3-1) upravit do následujícího tvaru:

$$\Delta V \cdot p_A = \Delta p \cdot V_0, \quad (3.4)$$

kde značí:  $\Delta V$  – změnu objemu uvolněných plynů ze směsi;

$\Delta p$  – změnu tlaku uvolněných plynů ze směsi;

$V_0$  – objem měřicí soustavy ( $V_0 = 1995 \text{ cm}^3$ );

$p_A$  – atmosferický tlak ( $97 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ )

### 3.2 Popis metodiky přípravy vzorků pro sledování plynatosti

Ke sledování plynatosti byly použity směsi o různé konzistenci (od sypké až po kašovitou, dle její charakteristiky pro následné zpracování). Sledování plynatosti vzorků směsí bylo prováděno na základě experimentů, které lze rozdělit do tří skupin:

- A) Sledování plynatosti komplexní směsi „v kašovitém stavu“ před jejím vytvrzením;
- B) Sledování plynatosti komplexní směsi po jejím vytvrzení (vzorky již hotových jader před použitím);
- C) Sledování plynatosti sypkých komplexních směsí před jejím vytvrzením. Směs pro zkoušku plynatosti byla připravena netradičním způsobem. Nejprve se sypkou směsí se pracovalo jako s ostřivem, provedl se síťový rozbor a stanovila se součtová křivka (pro celý rozsah zjištěné zrnitosti). Pak na jednotlivých frakcích, zachycených na příslušných sítích, podle dále uvedeného postupu, byla měřena plynatost. Současně bylo provedeno měření plynatosti na této sypké komplexní směsi.

Záměr experimentů, výše uvedeného bodu C), byl prováděn na základě úvahy, resp. znalosti související s povrchovostí částic (menší částice mají při stejné hmotnosti větší povrch než částice větší). Z toho plyne, že menší částice ostřiva budou pokryty větším množstvím pojiva, tudíž by měly i uvolňovat při zahřívání více plynů.

Vzorek sledované směsi byl navážen na přesné váze LECO EB 25, viz obr.3-7. Navážka 1g směsi byla nasypána na keramickou lodičku z molybdenového plechu, která je součástí měřicího zařízení.

Lodička s navážkou se následně zasunuje do pece měřicího zařízení. Atmosféra pece je předem zahřátá na teplotu, při které chceme sledovat uvolňování plynů. To je počátek prováděného měření plynatosti směsi.





Obr. 3-7 Váha LECO EB25

Při sledování sypkých komplexních směsí byl nejdříve proveden síťový rozbor ostřiva, aby byla směs rozdělena nejen do jednotlivých velikostních frakcí, ale také aby byla získána součtová křivka zrnitosti směsi, viz příloha č. 1. Díky malému množství vzorku směsi zachyceného na nejmenších frakcích, bylo nutné provést u každé směsi síťový rozbor vícekrát (viz příloha č. 1), abychom na každé frakci získali minimálně 5 g směsi. Toto množství bylo potřebné, protože každé měření u každého vzorku jsem prováděl pětkrát a byl předpoklad, že k analýze plynatosti bude vždy použit 1 g navážky vzorku na jedno měření plynatosti. Současně bylo nutné i opakování měření z důvodů zprůměrování výsledných hodnot a získání minimálních chyb a odchylek měření. Síťový rozbor byl proveden na přístroji popsaném v příloze č.1. V příloze č. 3 jsou uvedeny obrázky sypkých komplexních měřených směsí a jejich jednotlivých frakcí.

Pokud byla sledována plynatost přímo z vytvrzeného jádra, byl z jádra odříznut vzorek ve tvaru malého hranolku, cca 50 x 5 x 5 mm odpovídající velikosti lodičky a následně byla zkontrolována jeho hmotnost a upravena na potřebnou hmotnost 1 g, stále ještě kompaktního celku. Tento vzorek byl opět položen na lodičku z molybdenového plechu a zasunut do předehřáté pece zkušebního zařízení. Na Obr. 3-8 jsou znázorněny odřezané části již hotového jádra ze směsi, které byly dále upraveny na odpovídající hranolek použitý pro experiment. Hranolek musí odpovídat svojí velikostí molybdenové lodičce a zároveň musí odpovídat svojí hmotností 1 gramu.



Obr. 3-8 Odřezané části jádra

### 3.3 Průběh sledování plynatosti vybraných směsí

V předchozí kapitole je stručně popsána příprava vzorků až do okamžiku jeho vložení do vyhřáté pece měřicího zařízení. Tato kapitola je zaměřena na charakteristiku použitých sledovaných vzorků a na sledování průběhu vývinu plynů v závislosti na čase jednotlivých směsí.

V tabulce 3-3 je uveden přehled, charakteristika a výrobce, popř. dodavatel použité směsi a v tabulce 3-4 jsou uvedeny další zjištěné hodnoty vlastností jednotlivých směsí.

Jak je z následující tabulky zřejmé, pro sledování plynatosti bylo použito 11 vzorků různých materiálů. Sledování plynatosti sypkých komplexních směsí bylo prováděno při teplotě 1000 °C. Sledování plynatosti jádrových směsí jiné konzistence bylo vzhledem k menší časové náročnosti přípravy vzorků prováděno při teplotách 800, 1000 a 1200 °C a to jak ve stavu před vytvrzením, tak po vytvrzení. Celkově bylo provedeno 252 úspěšných experimentů měření plynatosti uvedených směsí.

Tabulka 3-3 Přehled vzorků pro měření plynatosti

Číslo směsi	Označení směsi	Výrobce směsi	Charakter pojiva	Střední velikost ostřiva $d_{50}$ [mm]	Poznámka
1.	15731	Hüttenes – Albertus	výrobce neudává	0,283	sypká komplexní směs
2.	15947	Hüttenes – Albertus	výrobce neudává	0,241	sypká komplexní směs
3.	20020	Hüttenes – Albertus	výrobce neudává	0,214	sypká komplexní směs
4.	15970	Hüttenes – Albertus	výrobce neudává	0,265	sypká komplexní směs
5.	15994	Hüttenes – Albertus	výrobce neudává	0,301	sypká komplexní směs
6.	TPR 210 F	Sand team	výrobce neudává	0,246	sypká komplexní směs
7.	CT – Ostašov	Ostašovská slévárna	vodní sklo	-	jádrová komplexní směs
8.	Směs na bázi Novanolu	Ostašovská slévárna	pryskyřice	-	pouze vytvrzená jádra
9.	Cold Box	Ostašovská slévárna	pryskyřice	-	pouze vytvrzená jádra
10.	Hot Box	Ostašovská slévárna	pryskyřice	-	pouze vytvrzená jádra
11.	Směs na bázi Dorsilu V	Ostašovská slévárna	vodní sklo	-	pouze vytvrzená jádra

**Poznámka:** Ostašovská slévárna (Ferex Castings Liberec) .

Tabulka 3-4 Další zjištěné hodnoty vlastností jednotlivých směsí

Číslo směsi	Označení Směsi	Ztráta žíháním [%]	Vlhkost [%]	Pevnost v tahu za tepla [MPa]
1.	15731	2,51	0,12	1,9
2.	15947	3,8 <sup>*)</sup> 4,2 <sup>**) ;</sup>	0,18	2,7
3.	20020	2,56	0,12	1,8
4.	15970	2,0	0,09	1,2
5.	15994	2,47 <sup>*)</sup> 2,4 <sup>**) ;</sup>	0,1	1,56
6.	TPR 210 F	3,05	0,13	1,77
7.	CT - Ostašov	-	-	-
8.	na bázi Novanolu	-	-	-
9.	Cold Box	-	-	-
10.	Hot Box	-	-	-
11.	na bázi Dorsilu V	-	-	-

**Poznámka:** U směsí s označením 7 až 11 nebyly tyto vlastnosti proměřeny z důvodu získáním vzorku již jen jako vytvrzené jádro.

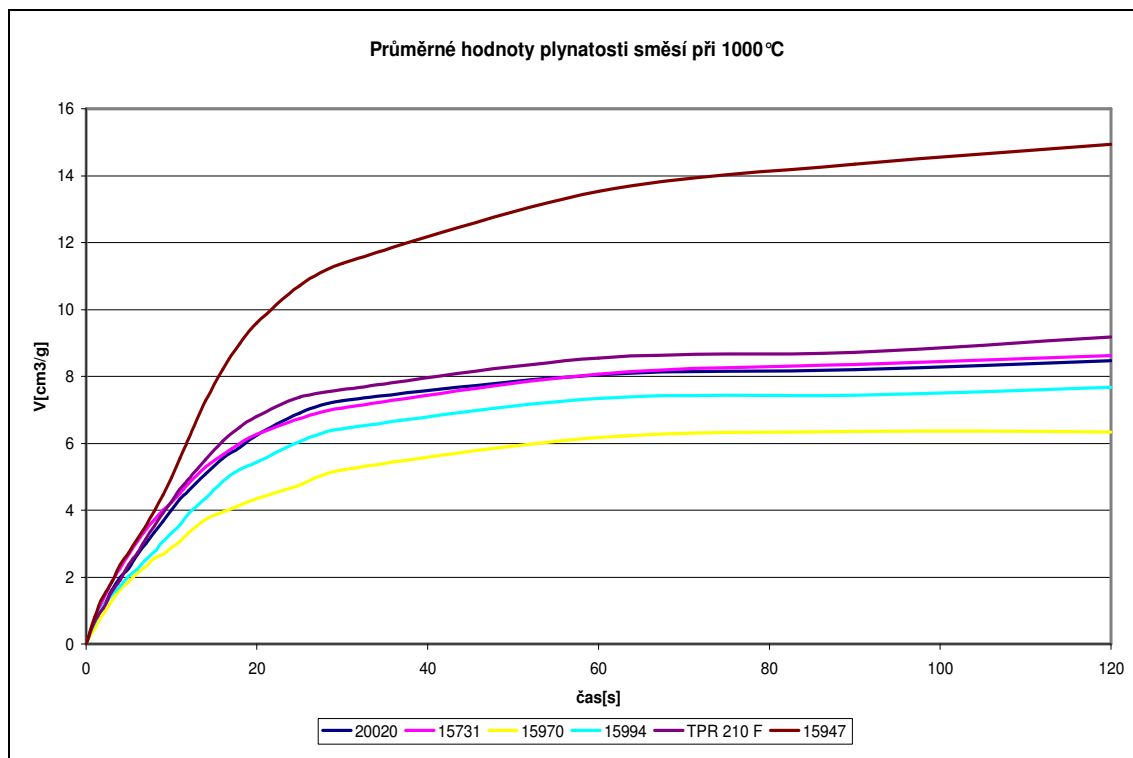
Označení <sup>\*)</sup> odpovídá naměřeným hodnotám v ŠKODA – AUTO a.s.. Označení <sup>\*\*) ;</sup> odpovídá uvedeným hodnotám dle výrobce (firma Hütteneš Albertu, Cz). Ostatní hodnoty uvedené v tabulce, byly naměřeny ve ŠKODA – AUTO a.s.

### 3.4 Vyhodnocení záznamů plynatosti

Z úspěšně naměřených hodnot plynatosti (252 provedených experimentů), které byly změřeny dle výše uvedeného rozdělení vzorků, bylo provedeno vyhodnocení a posouzení jejich plynatosti.

Každý vzorek ze všech hlavních skupin (A, B, C) měření plynatosti byl pětkrát, pro malé frakce čtyřikrát, proměřen. Z těchto naměřených hodnot plynatosti byly vypočítány pro jednotlivé skupiny experimentů průměrné hodnoty plynatosti (pro celý rozsah časového intervalu prováděného měření). Tyto průměrné hodnoty časových závislostí plynatosti jsou uvedeny v této části práce. Závislosti jsou pro lepší orientaci zpracovány dle stejných parametrů (kompl. směs, stejná frakce, stejná teplota, atd.). V následující části jsou na obr. 3-9 až obr. 3 –22 uvedeny grafické závislosti objemu

uvolněných plynů ( $V$ ), resp. hodnoty plynatosti v závislosti na čase. Na základě experimentálních zkušeností se ukázalo, že je postačující volit maximální dobu uvolňování plynů 120 [s]. Pro tento časový úsek byly sledovány všechny závislosti plynatosti směsí. Na obr. 3-9 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti sypkých komplexních směsí (č. 1, 2, 3, 4, 5, a 6), viz tabulka 3-3.



Obr. 3-9 Průměrné hodnoty plynatosti sypkých komplexních směsí v závislosti na čase při teplotě 1000 °C, (směs č.1, 2, 3, 4, 5 a 6)

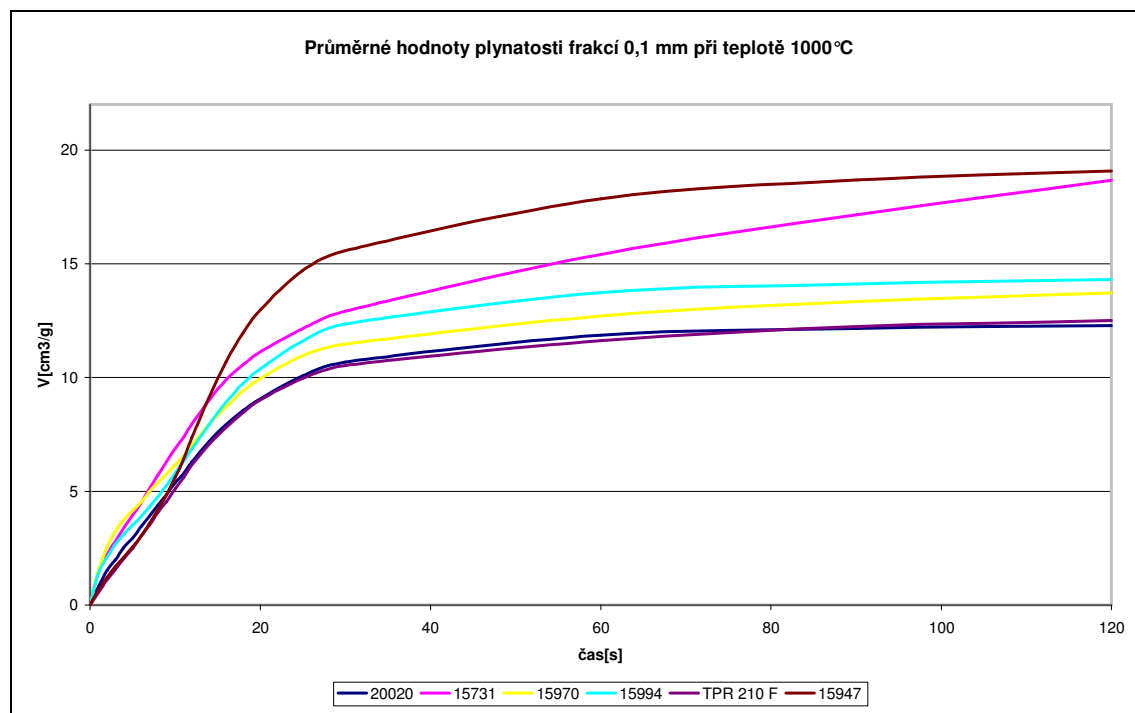
V tabulce 3-5 jsou informativně uvedeny hodnoty plynatosti pro určité časové okamžiky.

Tabulka 3-5 Průměrné hodnoty plynatosti v závislosti na čase sypkých komplexních směsí č. 1, 2, 3, 4, 5, 6

Hodnoty plynatosti [ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ]						
Čas[s]	označení směsi					
	č. 1 (15731)	č. 2 (15947)	č. 3 (20020)	č. 4 (15970)	č. 5 (15994)	č. 6 (TPR 210 F)
0	0	0	0	0	0	0
1	0,728045	0,8170058	0,607453	0,464149	0,650026	0,68148076
2	1,351572	1,4360525	1,109872	0,903482	1,120664	1,07244401

3	1,861973	1,8566512	1,614123	1,283992	1,466693	1,56838726
4	2,255909	2,3592329	1,995624	1,618753	1,728932	1,91129295
5	2,672014	2,7288146	2,260348	1,857805	2,032075	2,37164101
6	3,066942	3,1441189	2,675653	2,111098	2,248429	2,72151097
7	3,416635	3,5365348	3,005797	2,318656	2,532349	3,15800674
8	3,71299	3,9771846	3,347047	2,563491	2,763772	3,51731173
9	3,995756	4,4554253	3,671558	2,691875	3,062774	3,91753353
10	4,24127	4,9749222	4,016608	2,886346	3,317574	4,25794131
11	4,505316	5,5497532	4,331005	3,06758	3,560401	4,62968154
12	4,801834	6,140807	4,589104	3,323004	3,889066	4,93711422
14	5,292197	7,2771784	5,085414	3,73	4,363505	5,52037563
16	5,663571	8,2167718	5,552563	3,94421	4,857643	6,0640642
18	5,992901	8,9763121	5,870952	4,146798	5,217124	6,48398418
20	6,266558	9,6034498	6,241361	4,340454	5,438759	6,80683873
25	6,738024	10,704565	6,896505	4,752622	6,059136	7,37551996
30	7,062046	11,384906	7,267078	5,211803	6,441479	7,60197428
60	8,075681	13,522993	8,044022	6,17723	7,345939	8,5486948
90	8,363904	14,342184	8,205518	6,348323	7,439366	8,7140047
120	8,625478	14,94232	8,46925	6,348832	7,675432	9,18363846

Na obr. 3-10 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti frakcí sypkých komplexních směsí (č. 1, 2, 3, 4, 5, a 6) viz tabulka 3-3, o velikosti částic 0,1 mm při teplotě 1000 °C.



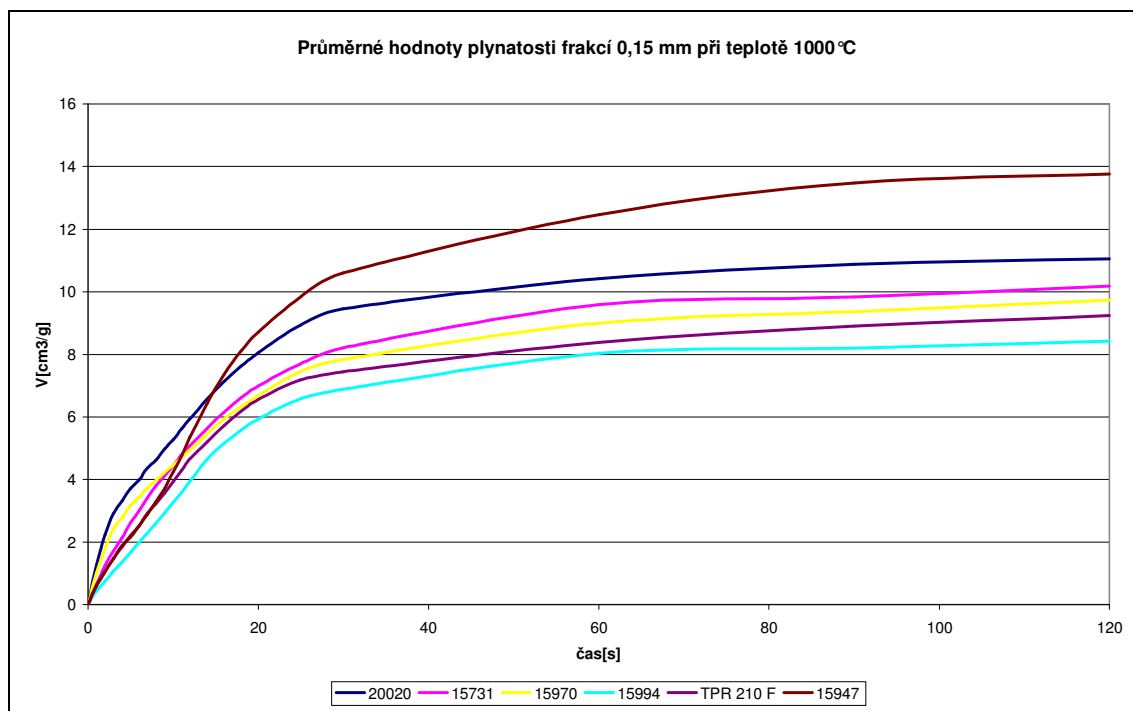
Obr. 3-10 Průměrné hodnoty plynatosti frakcí sypkých komplexních směsí o velikosti částic 0,1 mm v závislosti na čase při teplotě 1000 °C, (směs č.1, 2, 3, 4, 5 a 6)

V tabulce 3-6 jsou též informativně uvedeny průměrné hodnoty plynatosti frakcí sypkých komplexních směsí o velikosti částic 0,1 mm při teplotě 1000 °C, (směs č.1, 2, 3, 4, 5 a 6) pro určité časové okamžiky.

Tabulka 3-6 Průměrné hodnoty plynatosti frakcí sypkých komplexních směsí o velikosti částic 0,1 mm v závislosti na čase při teplotě 1000 °C, (směs č.1,2,3,4,5 a 6) pro určité časové okamžiky

Hodnoty plynatosti [ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ]						
Čas[s]	označení směsi					
	č. 1 (15731)	č. 2 (15947)	č. 3 (20020)	č. 4 (15970)	č. 5 (15994)	č. 6 (TPR 210 F)
0	0	0	0	0	0	0
1	1,437264	0,6600992	0,809879	1,533973	1,414881	0,5587439
2	2,216655	1,2140645	1,535276	2,541757	2,10257	1,12081382
3	2,810333	1,6936356	1,989814	3,239966	2,671997	1,55978034
4	3,40586	2,1168816	2,550078	3,768209	3,126932	2,0612217
5	3,95584	2,5606674	2,941001	4,155418	3,517044	2,48925988
6	4,502292	3,044542	3,474915	4,531038	3,891034	3,03510697
7	5,108577	3,575456	3,887219	4,974366	4,309077	3,50672277
8	5,712827	4,1908643	4,382674	5,383941	4,767949	4,07176574
9	6,306063	4,8528098	4,868218	5,756438	5,256008	4,55445922
10	6,877781	5,6250977	5,380737	6,154423	5,804733	5,11652914
11	7,393178	6,4480496	5,802979	6,55324	6,343938	5,61285251
12	7,964473	7,3750584	6,294632	7,027418	6,874863	6,15536001
14	8,996302	9,1376037	7,199933	7,953629	7,930296	7,07076166
16	9,900148	10,69175	7,938418	8,705903	8,914272	7,8069113
18	10,56649	11,959669	8,560288	9,410968	9,738395	8,46422752
20	11,12349	12,98506	9,073812	9,954314	10,38217	9,01585781
25	12,13625	14,70043	10,06856	10,95814	11,60575	9,95811197
30	12,91607	15,577223	10,68229	11,46029	12,36111	10,5310967
60	15,40422	17,855124	11,86987	12,69979	13,73398	11,6237411
90	17,14752	18,688177	12,16041	13,34667	14,11311	12,2371811
120	18,66159	19,076493	12,29359	13,71814	14,31255	12,5015384

Na obr. 3-11 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti frakcí sypkých směsí o velikosti částic 0,15 mm při teplotě 1000 °C, označení směsí je v tabulce 3-3.



Obr. 3-11 Průměrné hodnoty plynatosti frakcí syvkých komplexních směsí o velikosti částic 0,15 mm v závislosti na čase při teplotě 1000 °C, (směs č. 1, 2, 3, 4, 5 a 6)

V tabulce 3-7 jsou opět informativně uvedeny průměrné hodnoty plynatosti frakcí syvkých komplexních směsí o velikosti částic 0,15 mm při teplotě 1000 °C, (směs č.1, 2, 3, 4, 5 a 6) pro určité časové okamžiky.

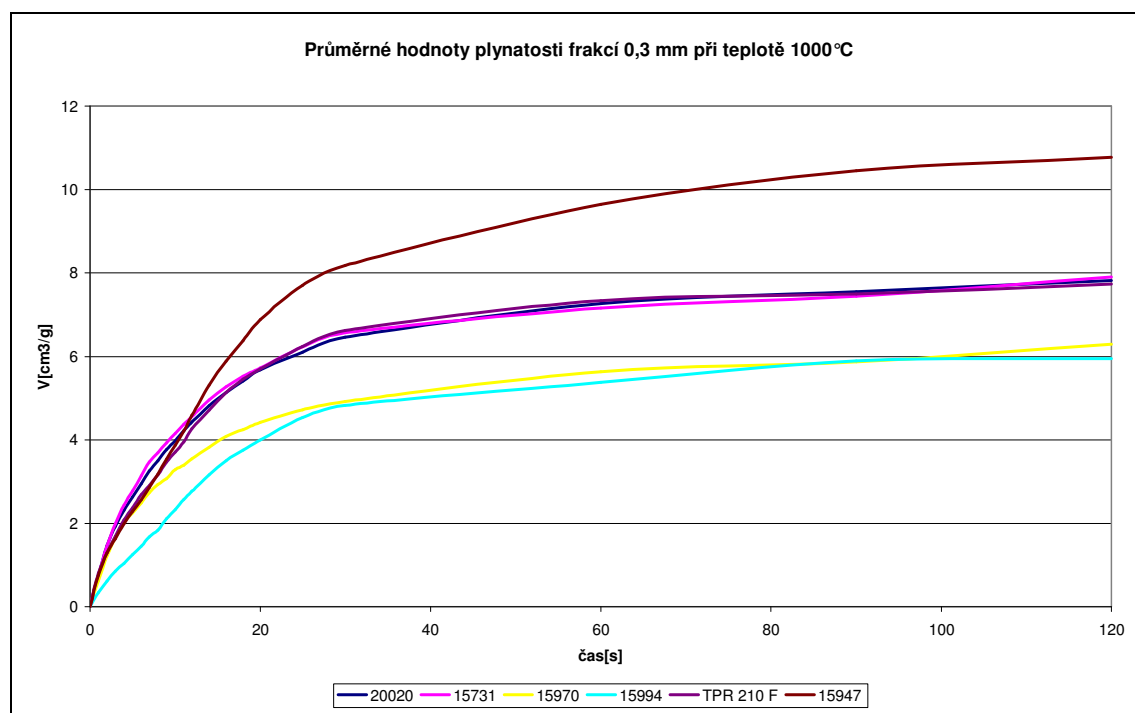
Tabulka 3-7 Průměrné hodnoty plynatosti frakcí syvkých komplexních směsí o velikosti částic 0,15 mm v závislosti na čase při teplotě 1000 °C, (směs č.1,2,3,4,5 a 6) pro určité časové okamžiky

<b>Hodnoty plynatosti [ cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>]</b>						
<b>Čas[s]</b>	<b>označení směsi</b>					
	<b>č. 1 (15731)</b>	<b>č. 2 (15947)</b>	<b>č. 3 (20020)</b>	<b>č. 4 (15970)</b>	<b>č. 5 (15994)</b>	<b>č. 6 (TPR 210 F)</b>
<b>0</b>	0	0	0	0	0	0
<b>1</b>	0,630654	0,6182185	1,260615	0,999217	0,433197	0,58375013
<b>2</b>	1,249049	1,0658191	2,234636	1,786723	0,75821	1,04789936
<b>3</b>	1,704917	1,4724893	2,90174	2,420024	1,065344	1,46815872
<b>4</b>	2,130159	1,8894498	3,308071	2,776492	1,355563	1,84585863
<b>5</b>	2,611902	2,1619661	3,720389	3,174555	1,667475	2,20732214
<b>6</b>	3,012463	2,5227373	3,993217	3,44509	1,990344	2,53365204
<b>7</b>	3,411178	2,8845402	4,363777	3,734643	2,280902	2,91978238
<b>8</b>	3,795177	3,2829293	4,615074	3,963908	2,60806	3,22591181
<b>9</b>	4,109071	3,702537	4,966112	4,233084	2,925796	3,55871726



<b>10</b>	4,441877	4,2394106	5,27239	4,453403	3,266706	3,92745728
<b>11</b>	4,808146	4,769673	5,630854	4,718276	3,600829	4,30218414
<b>12</b>	5,081952	5,3555816	5,9383	4,947567	3,941752	4,66129907
<b>14</b>	5,630949	6,4319897	6,574085	5,455444	4,648117	5,20314137
<b>16</b>	6,154573	7,3553466	7,134648	5,935517	5,164627	5,72960253
<b>18</b>	6,608323	8,1007955	7,618672	6,323629	5,576769	6,17803123
<b>20</b>	6,995268	8,7113846	8,058983	6,685256	5,934743	6,56217954
<b>25</b>	7,696325	9,8326871	8,943256	7,454204	6,581131	7,18453863
<b>30</b>	8,207554	10,602477	9,454295	7,839683	6,887885	7,43996325
<b>60</b>	9,577534	12,465264	10,42468	8,998766	8,032755	8,37111259
<b>90</b>	9,834113	13,472926	10,87873	9,368348	8,19725	8,90037032
<b>120</b>	10,18032	13,764801	11,04803	9,726974	8,426515	9,24095458

Na obr. 3-12 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti frakcí sypkých směsí č. 1, 2, 3, 4, 5 a 6 o velikosti částic 0,30 mm při teplotě 1000 °C, charakteristika směsí je v tabulce 3-3.



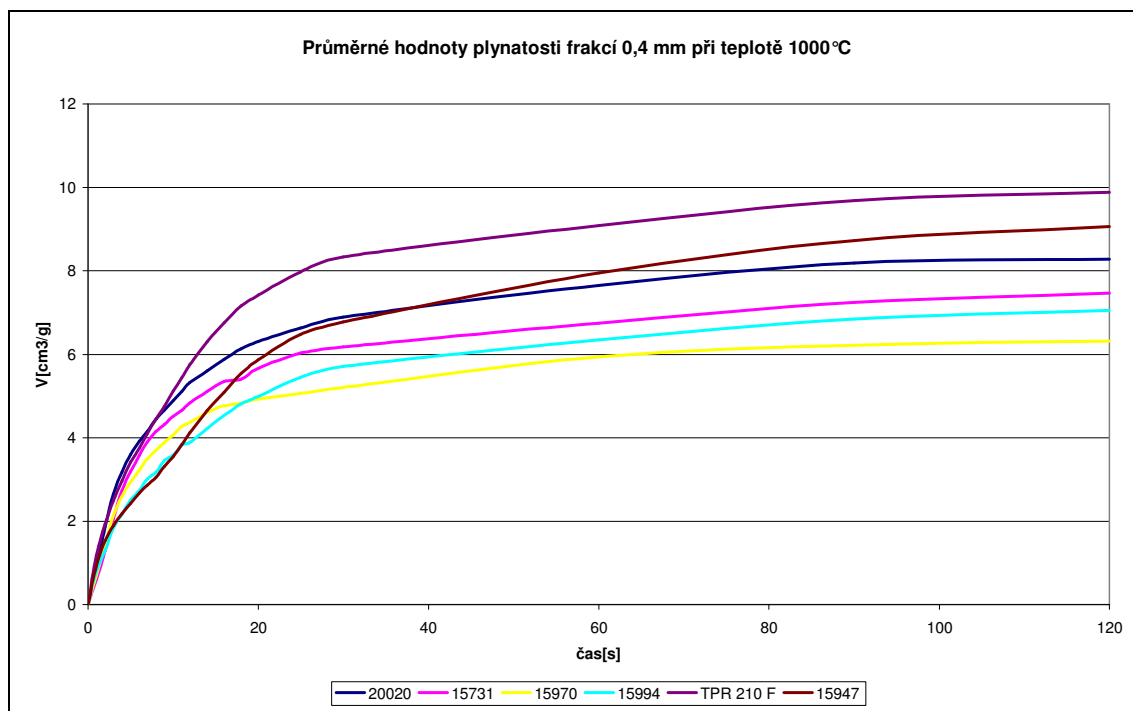
Obr. 3-12 Střední hodnoty plynatosti frakcí sypkých komplexních směsí o velikosti částic 0,30 mm v závislosti na čase při teplotě 1000 °C, (směs č.1, 2, 3, 4, 5 a 6)

V tabulce 3-8 jsou opět informativně uvedeny průměrné hodnoty plynatosti frakcí sypkých komplexních směsí o velikosti částic 0,30 mm při teplotě 1000 °C, (směs č.1, 2, 3, 4, 5 a 6) pro určité časové okamžiky.

Tabulka 3-8 Průměrné hodnoty plynatosti frakcí sypkých komplexních směsí o velikosti částic 0,30 mm v závislosti na čase při teplotě 1000 °C, (směs č.1,2,3,4,5 a 6) pro určité časové okamžiky

Hodnoty plynatosti [ cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> ]						
Čas[s]	označení směsi					
	č. 1 (15731)	č. 2 (15947)	č. 3 (20020)	č. 4 (15970)	č. 5 (15994)	č. 6 (TPR 210 F)
0	0	0	0	0	0	0
1	0,758373	0,7551826	0,751911	0,626513	0,339444	0,80804593
2	1,456782	1,2945541	1,471512	1,220866	0,614607	1,30301174
3	1,992	1,6333057	1,927041	1,649596	0,855615	1,69578055
4	2,44142	1,9861623	2,316171	2,019993	1,040813	2,07877493
5	2,779194	2,2831825	2,632061	2,249922	1,256651	2,37927049
6	3,138811	2,5662742	2,947463	2,490957	1,447497	2,68754486
7	3,469471	2,8611359	3,252764	2,730973	1,677929	2,90089874
8	3,695939	3,1843298	3,505881	2,928131	1,836777	3,16411575
9	3,930824	3,536847	3,775587	3,073567	2,116746	3,4642855
10	4,14749	3,8719603	3,981298	3,291061	2,331267	3,70994927
11	4,374936	4,215857	4,218518	3,393774	2,572125	3,9521377
12	4,558668	4,586742	4,431369	3,551644	2,771075	4,2658966
14	4,952767	5,3171084	4,81917	3,830093	3,163179	4,71414882
16	5,27049	5,8894415	5,137734	4,088355	3,502121	5,13505981
18	5,529227	6,3784476	5,40873	4,252348	3,754083	5,45409962
20	5,724878	6,8856721	5,682061	4,420346	4,001064	5,69579933
25	6,226645	7,7043342	6,101506	4,718656	4,531001	6,24012596
30	6,57304	8,1827242	6,46544	4,922914	4,829663	6,62708441
60	7,163578	9,6412986	7,267676	5,638551	5,372687	7,33609646
90	7,444185	10,45001	7,555261	5,869811	5,894315	7,50523466
120	7,900583	10,77619	7,824274	6,292894	5,948332	7,73482495

Na obr. 3-13 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti frakcí sypkých směsí č. 1, 2, 3, 4, 5 a 6 o velikosti částic 0,40 mm při teplotě 1000 °C, charakteristika směsí je v tabulce 3-3.



Obr. 3-13 Průměrné hodnoty plynatosti frakcí syvkých komplexních směsí o velikosti částic 0,40 mm v závislosti na čase při teplotě 1000 °C, (směs č.1, 2, 3, 4, 5 a 6)

V tabulce 3-9 jsou opět informativně uvedeny průměrné hodnoty plynatosti frakcí syvkých komplexních směsí o velikosti částic 0,40 mm při teplotě 1000 °C, (směs č.1, 2, 3, 4, 5 a 6) pro určité časové okamžiky.

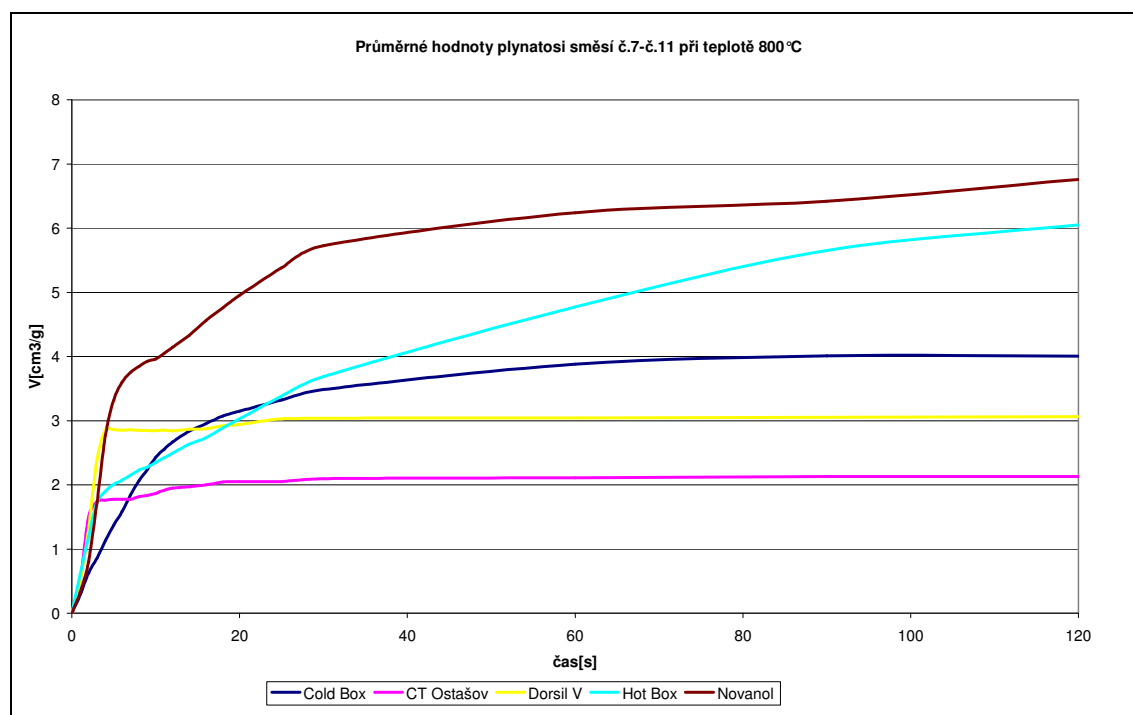
Tabulka 3-9 Průměrné hodnoty plynatosti frakcí syvkých komplexních směsí o velikosti částic 0,40 mm v závislosti na čase při teplotě 1000 °C, (směs č.1,2,3,4,5 a 6) pro určité časové okamžiky

<b>Hodnoty plynatosti [ cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>]</b>						
<b>Čas[s]</b>	<b>označení směsi</b>					
	<b>č. 1 (15731)</b>	<b>č. 2 (15947)</b>	<b>č. 3 (20020)</b>	<b>č. 4 (15970)</b>	<b>č. 5 (15994)</b>	<b>č. 6 (TPR 210 F)</b>
<b>0</b>	0	0	0	0	0	0
<b>1</b>	0,601833	0,9327784	0,87181	0,702699	0,795312	1,18345157
<b>2</b>	1,294934	1,5288009	1,85547	1,440682	1,286816	1,93071961
<b>3</b>	2,057434	1,8920835	2,651746	2,136593	1,836288	2,49278953
<b>4</b>	2,743924	2,1765056	3,178207	2,599263	2,169921	2,97002562
<b>5</b>	3,193656	2,4273009	3,600774	2,940173	2,510994	3,41197877
<b>6</b>	3,575673	2,667996	3,913176	3,215011	2,73381	3,74827314
<b>7</b>	3,900035	2,8702587	4,149242	3,496595	3,015585	4,09861825
<b>8</b>	4,146187	3,0514927	4,446248	3,702347	3,17013	4,44267786
<b>9</b>	4,319452	3,3190132	4,665412	3,886228	3,459371	4,76272226
<b>10</b>	4,513271	3,5511014	4,895505	4,070096	3,581796	5,12068327

<b>11</b>	4,659711	3,8340165	5,10689	4,271368	3,82298	5,43874564
<b>12</b>	4,83846	4,1217646	5,322552	4,362813	3,888577	5,74951791
<b>14</b>	5,104325	4,6525021	5,603173	4,605829	4,224029	6,30014362
<b>16</b>	5,354455	5,0939801	5,877169	4,766347	4,532806	6,75685342
<b>18</b>	5,405309	5,5359332	6,129621	4,826636	4,808621	7,16420241
<b>20</b>	5,659783	5,867897	6,308533	4,924693	4,995299	7,41646392
<b>25</b>	6,031822	6,477658	6,633193	5,063856	5,453027	7,97189538
<b>30</b>	6,178452	6,7765109	6,892283	5,207974	5,709782	8,33436348
<b>60</b>	6,748966	7,9483282	7,655286	5,937838	6,348703	9,08942391
<b>90</b>	7,242764	8,7305398	8,18901	6,221269	6,848652	9,68609799
<b>120</b>	7,464426	9,0618383	8,279953	6,316366	7,050588	9,88935164

V následující části práce jsou časové závislosti plynatosti vzorků již hotových jader označených v tabulce 3 – 3 čísly 7 až 11.

Na obr. 3-14 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti směsí již hotových jader č.7 až č.11 viz tabulka 3-3 při teplotě 800°C.



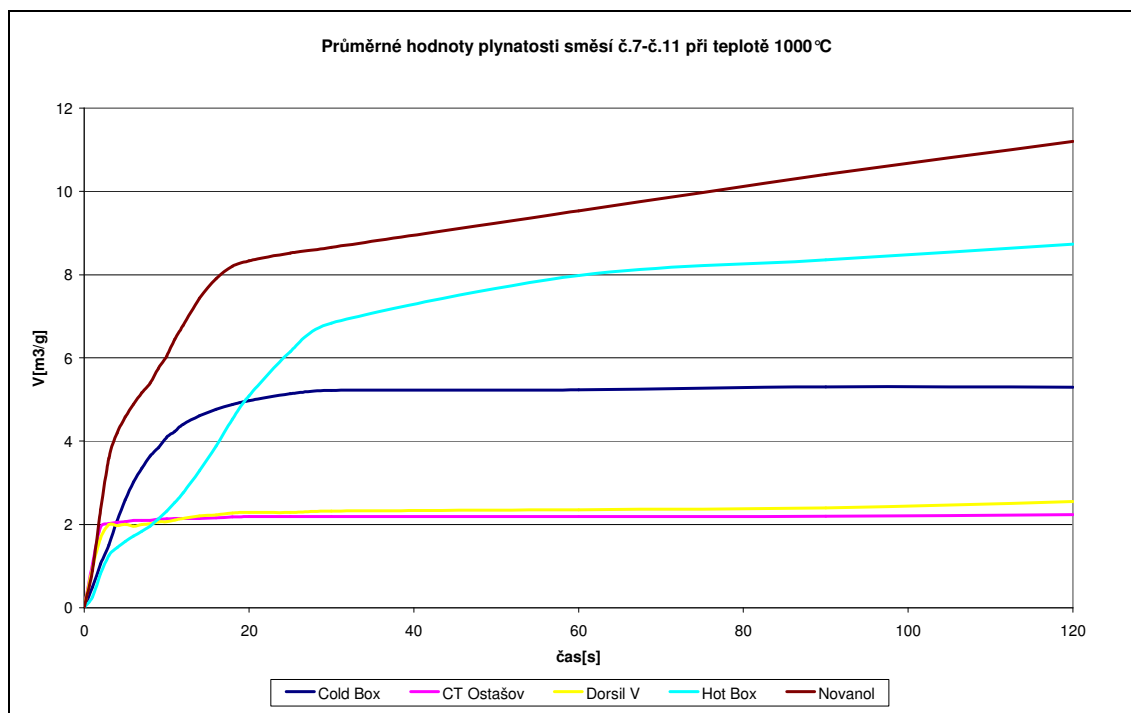
Obr. 3-14 Průměrné hodnoty plynatosti směsí již hotových jader č.7 až č.11 při teplotě 800°C

V tabulce 3-10 jsou informativně uvedeny průměrné hodnoty plynatosti směsí již hotových jader č.7 až č.11 viz tabulka 3-3 při teplotě 800°C.

Tabulka 3-10 Průměrné hodnoty plynatosti směsí již hotových jader č.7 až č.11 při teplotě 800°C

<b>Hodnoty plynatosti [ cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>]</b>					
<b>Čas[s]</b>	<b>označení směsi</b>				
	<b>č. 7 (CT Ostašov)</b>	<b>č. 8 (Novanol)</b>	<b>č. 9 (Cold Box)</b>	<b>č. 10 (Hot Box)</b>	<b>č. 11 (Dorsil V)</b>
<b>0</b>	0	0	0	0	0
<b>1</b>	0,50822915	0,3283255	0,285427	0,60577	0,506722
<b>2</b>	1,50530152	0,810218	0,627518	1,194366	1,312311
<b>3</b>	1,73654802	1,7270858	0,854624	1,725294	2,395195
<b>4</b>	1,76040033	2,7743607	1,132747	1,902034	2,856547
<b>5</b>	1,77628376	3,3154021	1,37112	2,004584	2,857024
<b>6</b>	1,77628376	3,598806	1,582329	2,071661	2,850425
<b>7</b>	1,77628376	3,7488976	1,840781	2,148187	2,85671
<b>8</b>	1,81406461	3,8441575	2,060923	2,226532	2,847085
<b>9</b>	1,83245953	3,9238326	2,238329	2,275743	2,847337
<b>10</b>	1,86443003	3,9604324	2,424857	2,347789	2,84509
<b>11</b>	1,91512126	4,0479134	2,554558	2,419861	2,848829
<b>12</b>	1,94610075	4,1416664	2,667046	2,49078	2,841954
<b>14</b>	1,96995305	4,3288466	2,834691	2,630717	2,863159
<b>16</b>	1,99729427	4,5591156	2,950816	2,730471	2,873435
<b>18</b>	2,04451016	4,7588804	3,072223	2,886495	2,919674
<b>20</b>	2,04915301	4,9505405	3,147771	3,027966	2,939861
<b>25</b>	2,05045626	5,3784293	3,320873	3,381325	3,026514
<b>30</b>	2,09336868	5,7269689	3,483726	3,683626	3,036777
<b>60</b>	2,11175003	6,2383476	3,877825	4,772157	3,040917
<b>90</b>	2,12832581	6,4167579	4,008856	5,649439	3,050917
<b>120</b>	2,12832581	6,757668	4,006033	6,048995	3,063109

Na obr. 3-15 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti směsí již hotových jader č.7 až č.11 viz tabulka 3-3 při teplotě 1000°C.



Obr. 3-15 Průměrné hodnoty plynatosti směsí již hotových jader č.7 až č.11 při teplotě 1000 °C

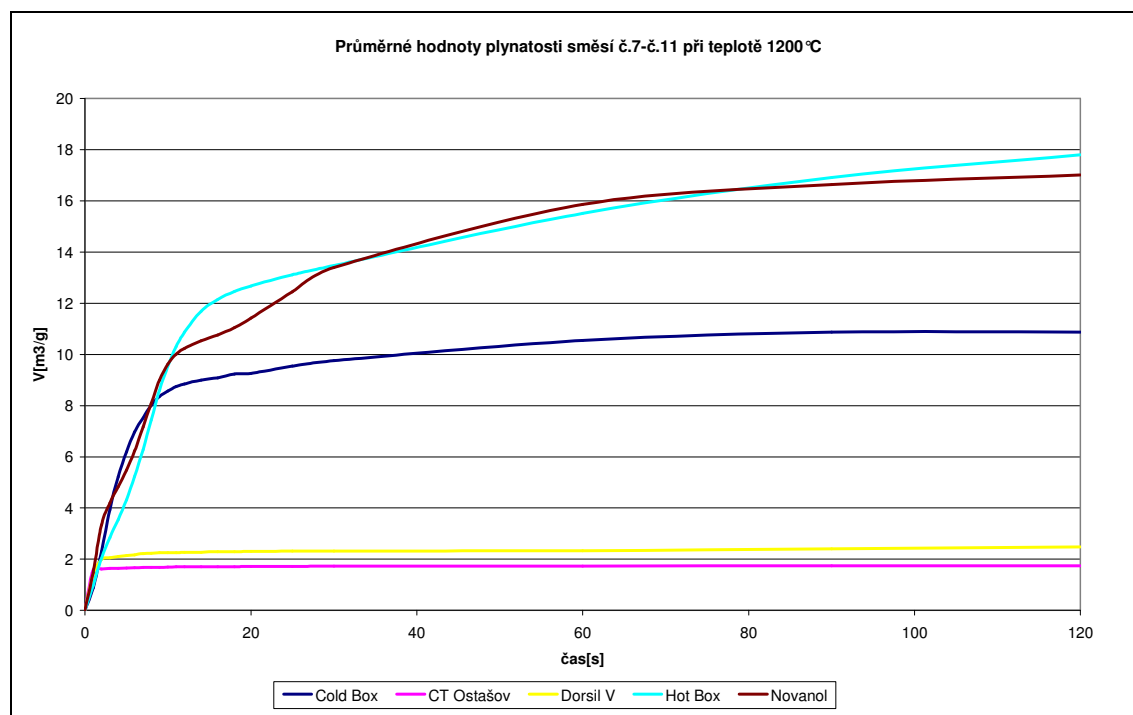
V tabulce 3-11 jsou informativně uvedeny průměrné hodnoty plynatosti směsí již hotových jader č.7 až č.11 viz tabulka 3-3 při teplotě 1000 °C.

Tabulka 3-11 Průměrné hodnoty plynatosti směsí již hotových jader č.7 až č.11 při teplotě 1000 °C

Hodnoty plynatosti [ cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> ]					
Čas[s]	označení směsi				
	č. 7 (CT Ostašov)	č. 8 (Novanol)	č. 9 (Cold Box)	č. 10 (Hot Box)	č. 11 (Dorsil V)
0	0	0	0	0	0
1	1,04990854	0,8978484	0,493486	0,262402	0,949368
2	1,94413229	2,3546037	1,050071	0,81816	1,67163
3	2,0216353	3,5875925	1,509116	1,249538	1,991837
4	2,0483249	4,2013311	2,095038	1,446316	1,969478
5	2,06420833	4,5768725	2,594471	1,594439	2,004937
6	2,09828366	4,8892874	3,018545	1,720488	1,960043
7	2,09851383	5,1690802	3,351174	1,834469	1,997797
8	2,09933735	5,3985076	3,645384	1,964346	2,016857
9	2,12498622	5,7526946	3,846153	2,136295	2,063082
10	2,13511361	6,0443932	4,095645	2,319497	2,064738
11	2,14239012	6,4502624	4,236098	2,524746	2,105655
12	2,14407349	6,7807057	4,407734	2,759319	2,14425

<b>14</b>	2,14837695	7,4296051	4,610811	3,292541	2,2072
<b>16</b>	2,16147739	7,9048591	4,7637	3,879468	2,227238
<b>18</b>	2,17703501	8,2012141	4,882975	4,528177	2,277929
<b>20</b>	2,18613065	8,3322593	4,974094	5,088753	2,285056
<b>25</b>	2,18679586	8,5217608	5,140083	6,146617	2,28454
<b>30</b>	2,18746106	8,6539327	5,221075	6,838578	2,321832
<b>60</b>	2,19192743	9,5320694	5,233999	7,981738	2,353314
<b>90</b>	2,19491406	10,405414	5,30508	8,352161	2,401019
<b>120</b>	2,2371477	11,204188	5,299786	8,736798	2,547608

Na obr. 3-16 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti směsí již hotových jader č.7 až č.11 viz tabulka 3-3 při teplotě 1200°C.



Obr. 3-16 Průměrné hodnoty plynatosti směsí již hotových jader č.7 až č.11 při teplotě 1200°C

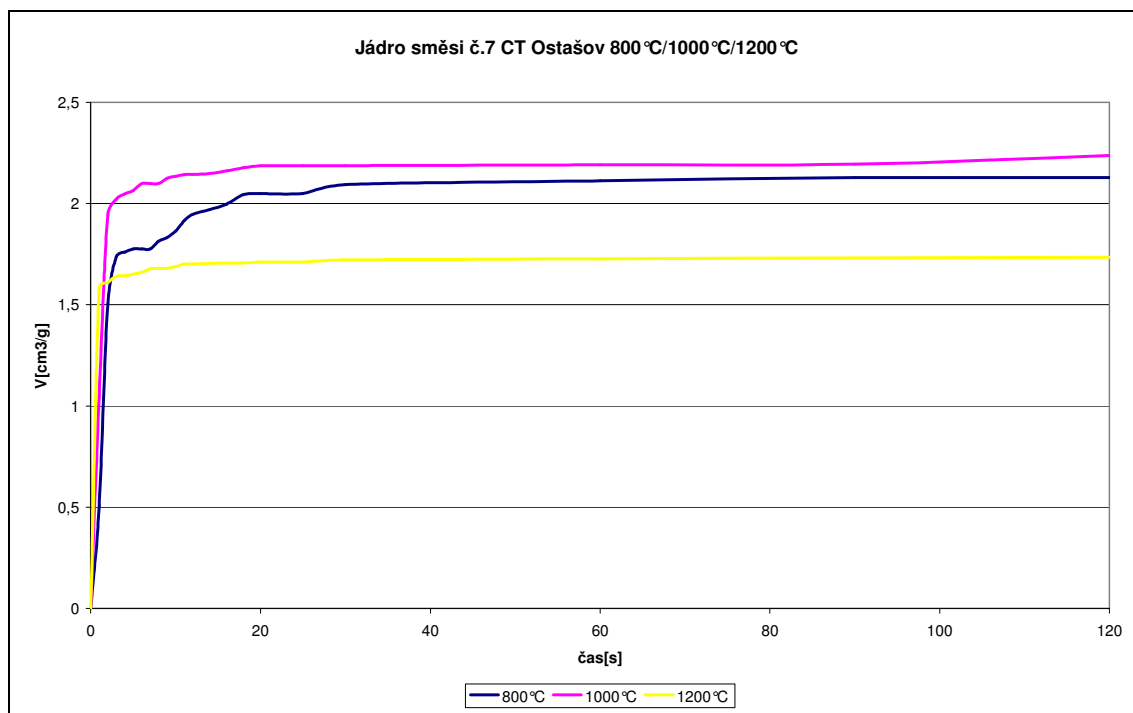
V tabulce 3-12 jsou informativně uvedeny průměrné hodnoty plynatosti směsí již hotových jader č.7 až č.11 viz tabulka 3-3 při teplotě 1200°C.

Tabulka 3-12 Průměrné hodnoty plynatosti směsí již hotových jader č.7 až č.11 při teplotě 1200°C

Hodnoty plynatosti [ cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> ]					
Čas[s]	označení směsi				
	č. 7 (CT Ostašov)	č. 8 (Novanol)	č. 9 (Cold Box)	č. 10 (Hot Box)	č. 11 (Dorsil V)
0	0	0	0	0	0
1	1,58364622	1,4774851	0,881761	0,977374	1,391158
2	1,61014576	3,3476848	2,297953	2,025477	1,98156
3	1,64013422	4,1925477	3,923181	2,837976	2,05609
4	1,64360957	4,8274778	5,211137	3,546336	2,098853
5	1,65056027	5,4748703	6,191159	4,324095	2,137435
6	1,66018536	6,2219618	6,971388	5,237664	2,170573
7	1,67691048	7,1731623	7,51786	6,283446	2,222092
8	1,67872961	8,0815997	8,011848	7,432415	2,231364
9	1,67989711	8,9912317	8,358759	8,59515	2,250248
10	1,68782525	9,6222113	8,56747	9,542686	2,252732
11	1,7010886	10,013636	8,743708	10,31115	2,257864
12	1,70241901	10,234457	8,849068	10,86792	2,263824
14	1,70407523	10,531477	8,997015	11,6889	2,271114
16	1,70574502	10,763551	9,087116	12,13899	2,293663
18	1,70704828	11,043846	9,234723	12,45556	2,293826
20	1,71053721	11,415899	9,266029	12,67338	2,299446
25	1,71170471	12,452911	9,543663	13,11287	2,310551
30	1,72198142	13,397961	9,754546	13,4783	2,315682
60	1,72711299	15,861414	10,54638	15,50875	2,327113
90	1,73208166	16,639974	10,87005	16,9143	2,399009
120	1,73538052	17,00904	10,87586	17,80636	2,477205

Na obr. 3-17 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti již hotových jader směsi č.7 CT Ostašov viz tabulka 3-3 při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C.





Obr. 3-17 Průměrné hodnoty plynatosti hotových jader č.7 CT Ostašov při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C

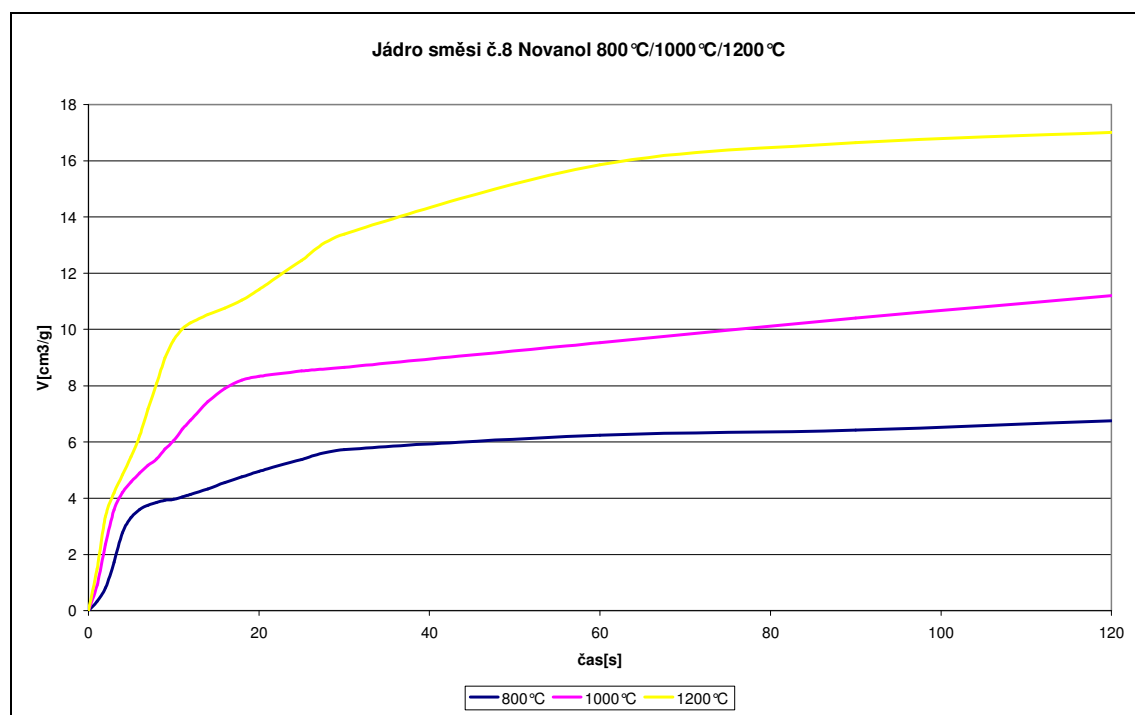
V tabulce 3-13 jsou informativně uvedeny průměrné hodnoty plynatosti směsi č.7 CT Ostašov při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C

Tabulka 3-13 Průměrné hodnoty plynatosti směsi č.7 CT Ostašov při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C

Hodnoty plynatosti [ cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> ] směsi č.7 CT Ostašov			
Čas[s]	teplota[°C]		
	800	1000	1200
0	0	0	0
1	0,508229	1,049909	1,583646
2	1,505302	1,944132	1,610146
3	1,736548	2,021635	1,640134
4	1,7604	2,048325	1,64361
5	1,776284	2,064208	1,65056
6	1,776284	2,098284	1,660185
7	1,776284	2,098514	1,67691
8	1,814065	2,099337	1,67873
9	1,83246	2,124986	1,679897
10	1,86443	2,135114	1,687825
11	1,915121	2,14239	1,701089
12	1,946101	2,144073	1,702419
14	1,969953	2,148377	1,704075

<b>16</b>	1,997294	2,161477	1,705745
<b>18</b>	2,04451	2,177035	1,707048
<b>20</b>	2,049153	2,186131	1,710537
<b>25</b>	2,050456	2,186796	1,711705
<b>30</b>	2,093369	2,187461	1,721981
<b>60</b>	2,11175	2,191927	1,727113
<b>90</b>	2,128326	2,194914	1,732082
<b>120</b>	2,128326	2,237148	1,735381

Na obr. 3-18 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti již hotových jader směsi č.8 Novanol viz tabulka 3-3 při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C.



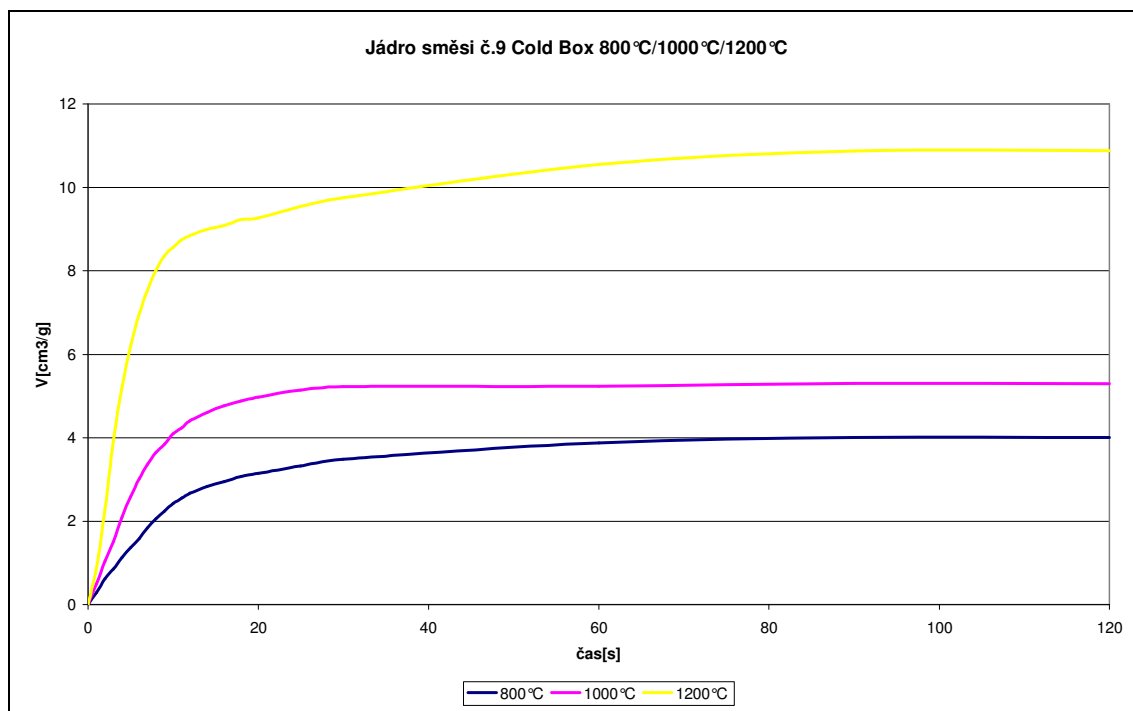
Obr. 3-18 Průměrné hodnoty plynatosti hotových jader č.8 Novanol při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C

V tabulce 3-14 jsou informativně uvedeny průměrné hodnoty plynatosti směsi č.8 Novanol při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C.

Tabulka 3-14 Průměrné hodnoty plynatosti směsi č.8 Novanol při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C

<b>Hodnoty plynatosti [ cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>] směsi č. 8 Novanol</b>			
<b>Čas[s]</b>	<b>teplota[°C]</b>		
	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1200</b>
<b>0</b>	0	0	0
<b>1</b>	0,328326	0,897848	1,477485
<b>2</b>	0,810218	2,354604	3,347685
<b>3</b>	1,727086	3,587593	4,192548
<b>4</b>	2,774361	4,201331	4,827478
<b>5</b>	3,315402	4,576873	5,47487
<b>6</b>	3,598806	4,889287	6,221962
<b>7</b>	3,748898	5,16908	7,173162
<b>8</b>	3,844157	5,398508	8,0816
<b>9</b>	3,923833	5,752695	8,991232
<b>10</b>	3,960432	6,044393	9,622211
<b>11</b>	4,047913	6,450262	10,01364
<b>12</b>	4,141666	6,780706	10,23446
<b>14</b>	4,328847	7,429605	10,53148
<b>16</b>	4,559116	7,904859	10,76355
<b>18</b>	4,75888	8,201214	11,04385
<b>20</b>	4,95054	8,332259	11,4159
<b>25</b>	5,378429	8,521761	12,45291
<b>30</b>	5,726969	8,653933	13,39796
<b>60</b>	6,238348	9,532069	15,86141
<b>90</b>	6,416758	10,40541	16,63997
<b>120</b>	6,757668	11,20419	17,00904

Na obr. 3-19 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti již hotových jader směsi č.9 Cold Box viz tabulka 3-3 při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C.



Obr. 3-19 Průměrné hodnoty plynatosti hotových jader č.9 Cold Box při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C

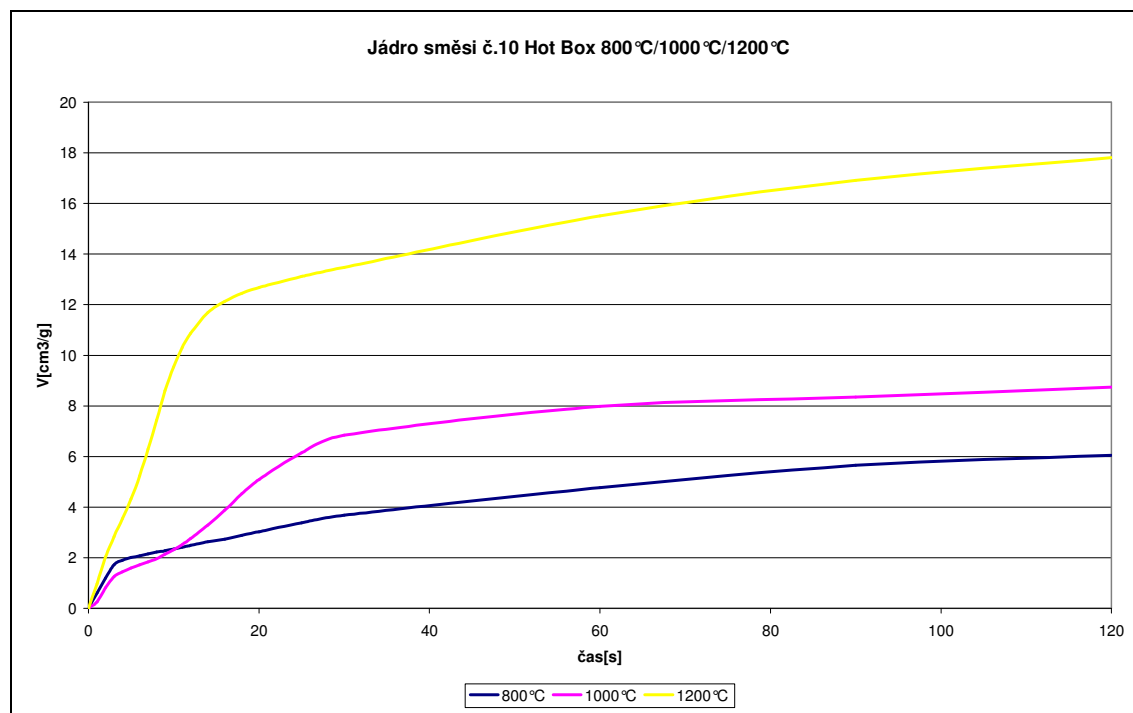
V tabulce 3-15 jsou informativně uvedeny průměrné hodnoty plynatosti směsi č.9 Cold Box při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C.

Tabulka 3-15 Průměrné hodnoty plynatosti směsi č.9 Cold Box při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C

Hodnoty plynatosti [ cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> ] směsi č.9 Cold Box			
Čas[s]	teplota[°C]		
	800	1000	1200
0	0	0	0
1	0,285427	0,493486	0,881761
2	0,627518	1,050071	2,297953
3	0,854624	1,509116	3,923181
4	1,132747	2,095038	5,211137
5	1,37112	2,594471	6,191159
6	1,582329	3,018545	6,971388
7	1,840781	3,351174	7,51786
8	2,060923	3,645384	8,011848
9	2,238329	3,846153	8,358759
10	2,424857	4,095645	8,56747
11	2,554558	4,236098	8,743708
12	2,667046	4,407734	8,849068

<b>14</b>	2,834691	4,610811	8,997015
<b>16</b>	2,950816	4,7637	9,087116
<b>18</b>	3,072223	4,882975	9,234723
<b>20</b>	3,147771	4,974094	9,266029
<b>25</b>	3,320873	5,140083	9,543663
<b>30</b>	3,483726	5,221075	9,754546
<b>60</b>	3,877825	5,233999	10,54638
<b>90</b>	4,006033	5,30508	10,87005
<b>120</b>	4,008856	5,299786	10,87586

Na obr. 3-20 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti již hotových jader směsi č.10 Hot Box, viz tabulka 3-3 při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C.



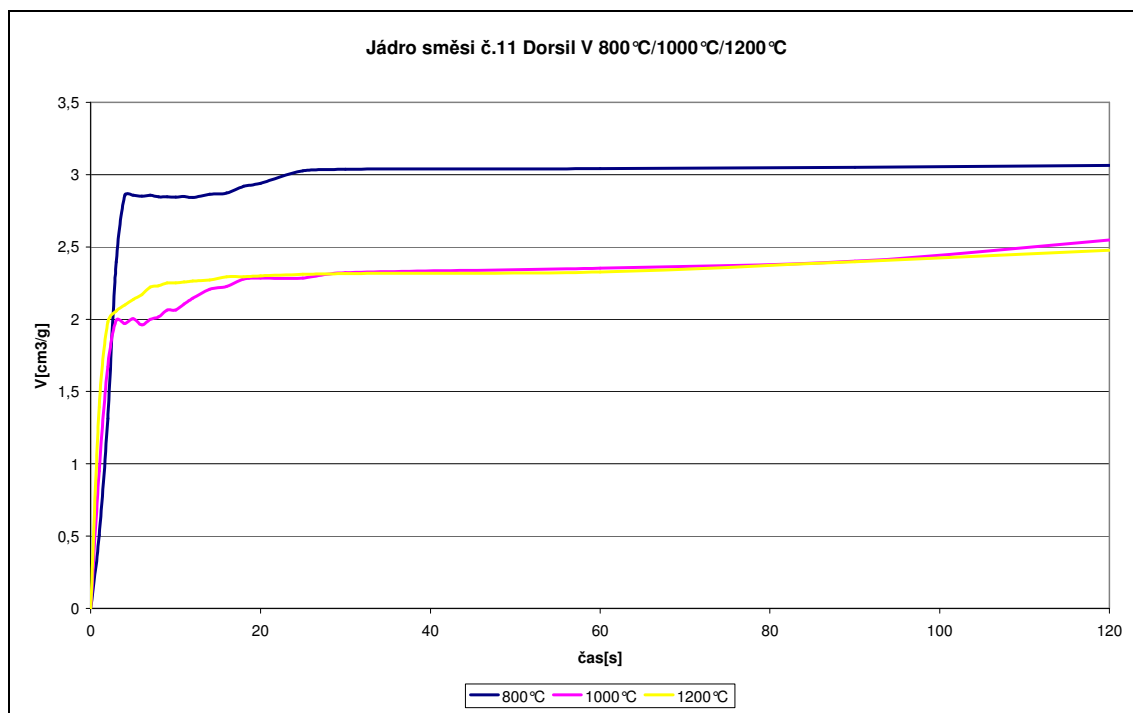
Obr. 3-20 Průměrné hodnoty plynatosti hotových jader č.10 Hot Box při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C

V tabulce 3-16 jsou informativně uvedeny průměrné hodnoty plynatosti směsi č.10 Hot Box při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C.

Tabulka 3-16 Průměrné hodnoty plynatosti směsi č.10 Hot Box při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C

<b>Hodnoty plynatosti [ cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup> ] směsi č.10 Hot Box</b>			
<b>Čas[s]</b>	<b>teplota[°C]</b>		
	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1200</b>
<b>0</b>	0	0	0
<b>1</b>	0,60577	0,262402	0,977374
<b>2</b>	1,194366	0,81816	2,025477
<b>3</b>	1,725294	1,249538	2,837976
<b>4</b>	1,902034	1,446316	3,546336
<b>5</b>	2,004584	1,594439	4,324095
<b>6</b>	2,071661	1,720488	5,237664
<b>7</b>	2,148187	1,834469	6,283446
<b>8</b>	2,226532	1,964346	7,432415
<b>9</b>	2,275743	2,136295	8,59515
<b>10</b>	2,347789	2,319497	9,542686
<b>11</b>	2,419861	2,524746	10,31115
<b>12</b>	2,49078	2,759319	10,86792
<b>14</b>	2,630717	3,292541	11,6889
<b>16</b>	2,730471	3,879468	12,13899
<b>18</b>	2,886495	4,528177	12,45556
<b>20</b>	3,027966	5,088753	12,67338
<b>25</b>	3,381325	6,146617	13,11287
<b>30</b>	3,683626	6,838578	13,4783
<b>60</b>	4,772157	7,981738	15,50875
<b>90</b>	5,649439	8,352161	16,9143
<b>120</b>	6,048995	8,736798	17,80636

Na obr. 3-21 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti již hotových jader směsi č.11 Dorsil V, viz tabulka 3-3 při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C.



Obr. 3-21 Průměrné hodnoty plynatosti hotových jader č.11 Dorsil V při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C

V tabulce 3-17 jsou informativně uvedeny průměrné hodnoty plynatosti směsi č.11 Dorsil V při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C.

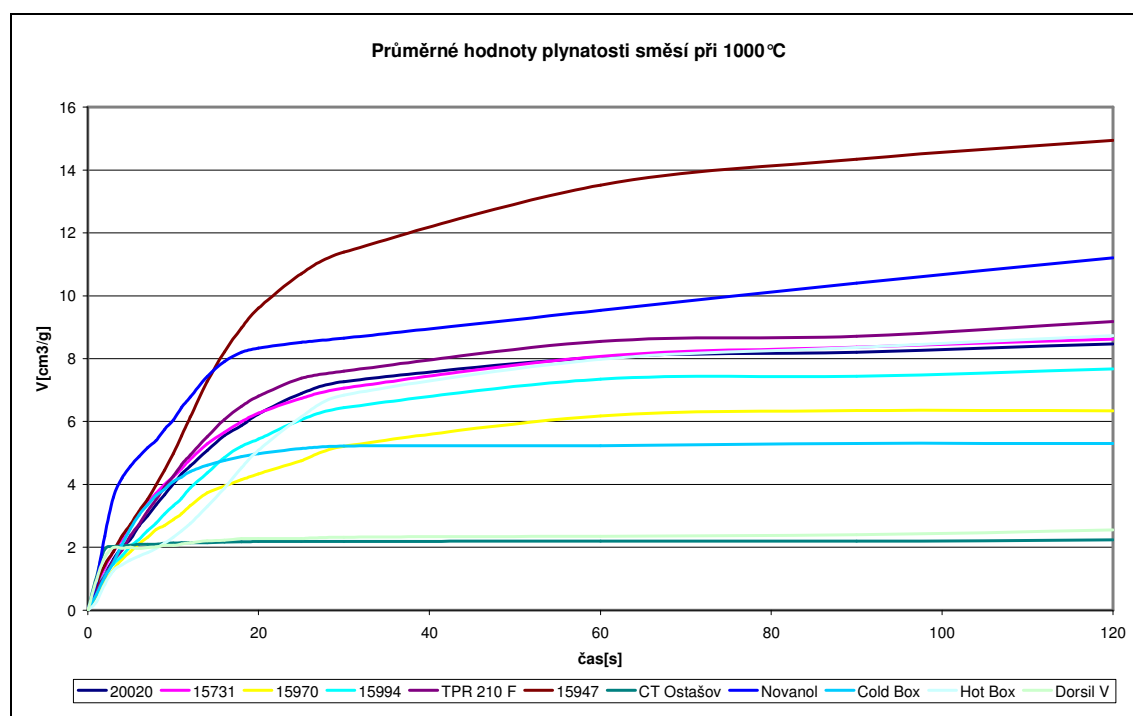
Tabulka 3-17 Průměrné hodnoty plynatosti směsi č.11 Dorsil V při teplotách 800°C, 1000°C a 1200°C

Hodnoty plynatosti [ cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> ] směsi č.11 Dorsil V			
Čas[s]	teplota[°C]		
	800	1000	1200
0	0	0	0
1	0,506722	0,949368	1,391158
2	1,312311	1,67163	1,98156
3	2,395195	1,991837	2,05609
4	2,856547	1,969478	2,098853
5	2,857024	2,004937	2,137435
6	2,850425	1,960043	2,170573
7	2,85671	1,997797	2,222092
8	2,847085	2,016857	2,231364
9	2,847337	2,063082	2,250248
10	2,84509	2,064738	2,252732
11	2,848829	2,105655	2,257864
12	2,841954	2,14425	2,263824
14	2,863159	2,2072	2,271114

<b>16</b>	2,873435	2,227238	2,293663
<b>18</b>	2,919674	2,277929	2,293826
<b>20</b>	2,939861	2,285056	2,299446
<b>25</b>	3,026514	2,28454	2,310551
<b>30</b>	3,036777	2,321832	2,315682
<b>60</b>	3,040917	2,353314	2,327113
<b>90</b>	3,050917	2,401019	2,399009
<b>120</b>	3,063109	2,547608	2,477205

V této části práce jsou pro přehled uvedeny grafické závislosti všech sledovaných směsí.

Na obr. 3-22 jsou uvedeny časové závislosti průměrných hodnot plynatosti všech měřených směsí (směs č.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10 a 11) dle tabulky 3-3 při teplotě 1000°C.



Obr. 3-22 Průměrné hodnoty plynatosti všech měřených směsí v závislosti na čase při teplotě 1000 °C, (směs č.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10 a 11)

Informativní průměrné hodnoty plynatosti pro jednotlivé směsi z obr. 3-22 jsou zaznamenány dle směsi a teploty v tabulkách 3-5 až 3-17.

Jak již bylo výše uvedeno, byla zjišťována maxima středních hodnot plynatostí z příslušných skupin experimentů (viz grafů) uvedených v této práci, na základě naměřených hodnot byly zjištěné výsledky podrobně statisticky zpracovány a jsou uvedeny v příloze č.5 této práce.



#### 4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této práci přinášejí dílčí informace o plynatosti a jejím měření u různých jádrových směsí. Naměřené hodnoty plynatosti přinášejí provozní jistoty, potřebné pro kvalitativní i kvantitativní rozhodování a uvědomělou volbu pojiv při výrobě jader i forem. Tím je plynatost důležitou vlastností směsí a výrazným způsobem ovlivňuje výrobu kvalitních odlitků.

Celá problematika sledování plynatosti je velmi složitá. Složitost vyplývá z toho, že pískové formy a jádra představují porézní systémy, což jsou v podstatě kapilárně pórovitá tělesa, vyrobená z několika složek, které jsou více, či méně plynotvorné.

Ve slévárenské praxi formy a jádra obsahují velké množství dalších látek, které doprovázejí např. ostřivo atd. a které se při tepelném zatížení rozkládají, čímž přispívají k tvorbě uvolňovaných plynů. Vzniká dehydratace pojiva směsi, tepelná disociace vodní páry, tepelná disociace uvolněných plynů, suchá destilace a spalování organických látek, karbonizace uhlíkových přísad, spalování organických látek, tepelný rozklad minerálů atd.

Co se týče plynatosti samotných pojiv, plynatost jílových směsí není tak výrazná jako u pojiv na bázi organických látek, jako jsou např. pryskyřice. Pryskyřice jsou pojivové systémy jádrových směsí a sledování jejich plynotvornosti je pro slévárenskou praxi významné, neboť jsou velmi často značně tepelně namáhány taveninou.

Pokud bych se vyjádřil k výsledkům provedených výpočtů uvolněných plynů z nejvíce uplatňovaných reakcí při tepelném zatížení forem, resp. formovacích a jádrových směsí, je možno konstatovat, že rovnice, které obsahují kyslík s uhlíkem za vzniku jeho oxidů, vzniká spálením 1g uhlíku  $1,87 \text{ dm}^3$  plynu.

Pokud probíhá reakce mezi uhlíkem a již jeho oxidem, množství vzniklého plynu, ze stejného množství uhlíku, je dvojnásobné. Stejně množství uvolněných plynů vzniká reakcí uhlíku s vodní párou.

Až trojnásobné množství uvolněných plynů vzniká reakcí uhlíku a vodní páry za vzniku oxidu uhličitého.

Též nezanedbatelné množství plynu vzniká rozkladem metanu, z  $1 \text{ dm}^3$  metanu vznikne dvojnásobné množství vodíku.

Též větší množství plynů vzniká při reakcích s uhlíkem. Uhlík je také stavebním prvkem organických látek a tím i stavební jednotkou pryskyřičných pojiv.

Pokud sledujeme procentuální podíly, viz tabulka 2-2, z celkového obsahu uvolněných plynů též je možno konstatovat, že největší podíl uvolněných plynů vzniká destilací organických látek, která činí u skořepinových forem až 90%.

Pokud se týká mechanismu uvolňování plynů, je možno konstatovat, a to také potvrdily provedené experimenty, největší rychlost vývinu uvolněných plynů nastává v počátku měření a v počátku odlévání. V tomto případě je důležité, aby tlak plynů uvolněných z formy nebo jádra byl menší, než tlak působící taveniny.

Metody sledování plynatosti, uvedeny v této práci, jsou spíše orientační. Posuzují pouze, zdali daná formovací, resp. jádrová směs, uvolňuje více či méně plynů při stejných podmínkách.

Zatím nebyla vyvinuta taková metoda měření plynatosti, která by posuzovala plynatost komplexně, tj. s ohledem na tvar a velikost dutiny slévárenské formy a jádra, včetně jejího materiálu při odlévání daného odlitku. Do jisté míry se z části tomuto požadavku přibližují metody přímé (provozní), které využívají teplot roztaveného kovu.

I když metody nepřímé (laboratorní) pracují s malým vzorkem směsi, bez přítomnosti taveniny, dostávaly přednost před přímými metodami. To bylo také díky tomu, že nároky na zařízení a přípravu vzorku jsou mnohem menší než u provozních měření. Pravděpodobně také proto, že výsledky měření plynatosti (přímou metodou) nepřinášely očekávané výsledky, a proto začaly být rozvíjeny nepřímé metody. Tepelné zatížení sledovaných vzorků je vyvoláno teplem odporové pece. Těmto metodám začala být věnována velká pozornost a postupně se začala konstruovat nejrůznější měřicí zařízení.

Plynatostí a konstrukcí těchto zařízení se věnuje již řadu let pozornost i na našem pracovišti KSP TU v Liberci, kde bylo v poslední době zrekonstruováno měřicí zařízení plynatosti, které zobrazuje nejen maximální hodnotu objemu uvolněného plynu, ale celý časový průběh plynatosti.

Provedená kalibrace dvěma způsoby (zátěžovou pumpou AMETEK a tepelným rozkladem  $\text{CaCO}_3$ ) a jejich téměř shodné výsledky potvrzují plně dostačující vypovídací schopnost výsledků tohoto zařízení.

Výsledky plynatosti potvrzují nižší hodnoty u směsí s vodním sklem, které je anorganického původu. Směsi s vodním sklem by byly z tohoto pohledu pro výrobu jader příznivější, avšak k jejich menší použitelnosti přispívá velká zbytková pevnost po odlití. Vodní sklo, používané v této práci je označováno obchodním názvem Dorsil V.

Zjištěné hodnoty plynatosti vytvrzených jader s pojivem Dorsil V činily ve 120 [s] po zahřívání při teplotě 800 °C  $3,06 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , při 1000 °C  $2,55 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  a při 1200 °C  $2,48 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ . Hodnoty plynatosti vytvrzeného jádra označeného CT Ostašov jsou ještě nižší a vykazují v časovém okamžiku 120 [s] po zahřátí plynatost při teplotě 800 °C  $2,13 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , při 1000 °C  $2,23 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  a při 1200 °C  $1,73 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ .

Vyšší hodnoty plynatosti vykazují pryskyřice, které jsou látky organického původu. Nejvyšší hodnoty plynatosti již vytvrzených jader vykazovala směs č.8 Novanol na bázi pryskyřic. Hodnoty plynatosti činily ve 120 [s] po zahřívání při teplotě 800 °C  $6,76 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , při 1000 °C  $11,2 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  a při 1200 °C  $17 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ .

Při posuzování plynatosti komplexních směsí v porovnání s jejich velikostními frakcemi vyšel najevo předpoklad, že menší frakce, které ve stejném objemu mají větší celkový povrch, vykazují větší plynatost. To je způsobeno pravděpodobně tím, že ostřivo je díky většímu povrchu obaleno větším množstvím pojiva, které se hlavním dílem podílí na plynatosti směsi.

U směsi č.2 s označením 15 947, která při teplotě 1000°C vykazovala nejvyšší plynatost, činily hodnoty plynatosti na jednotlivých měřených frakcích velké rozdíly, což potvrzuje náš předpoklad. Hodnota komplexní směsi při 1000°C je  $14,9 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , na velikostní frakci 0,1 mm je to až  $19,07 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , na velikostní frakci 0,15 mm  $13,8 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , na velikostní frakci 0,3 mm  $10,8 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  a na velikostní frakci 0,4 mm  $9,06 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ . Při porovnání jednotlivých frakcí u sledovaných směsí se dá konstatovat, až na drobné odchylky, že směs vykazující velkou plynatost na komplexní směsi, vykazuje též velkou plynatost na svých jednotlivých frakcích v porovnání se stejnými frakcemi ostatních směsí.

Při porovnání všech měřených směsí č.1 až č.11 dle tabulky 3-3 při teplotě 1000°C bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty jednoznačně vykazuje sypká směs č.2 s označením 15 947 s hodnotou  $14,9 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ . Naopak nejmenší plynatost, dle měření, vykazovala směs č.7 - CT Ostašov (již vytvrzené jádro) s hodnotou  $2,23 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ .

V této souvislosti je nutno upozornit, že provedená měření plynatosti na vzorcích č.1 až č.6 byly získány od firem Hüttenes –Albertus a Sand team. Tyto firmy si nepřejí

zveřejňovat přesné složení směsí, především typ pojiva. Tím, bohužel, lze jen konstatovat, větší, či menší hodnotu plynatosti dané směsi. A nelze posoudit plynatost v závislosti na druhu pojiva popř. nějaké plynotvorné složky.

Po seznámení se zařízením pro měření plynatosti na katedře KSP TU v Liberci a při práci s ním, a se zpracováváním hodnot výsledků, bych ještě doporučil, konstrukčně vylepšit systém samotného zakládání vzorku směsi na molybdenové lodičce do pece. Nejlépe nějakým poloautomatickým nebo automatickým mechanismem, který by zaručoval přesné a stále stejně rychlé zakládání a utěsnění vzorku do pece spojené přímo se spouštěním měřicího programu. Utěsnění při založení vzorku do pece je důležité, aby neunikaly plyny ven či nevnikaly dovnitř měřicího zařízení. Důležité je také zatlačit zátku stejným tlakem. Vyšší či menší tlak od minulého měření vyvolá nepřesnost ve výsledcích. Tento navýšený tlak se při výpočtech uvolněných plynů samozřejmě odečítá. Ale musí se pravidelně kontrolovat jeho hodnota. To jsem se snažil nyní při ručním zakládání vzorku eliminovat jednak snahou o naučení se stále stejného způsobu zakládání a také tím, že před každou sérií měření jsem proměřil hodnoty zakládání lodičky do pece na prázdno bez vzorku směsi. Tím jsem získal hodnoty samotného vložení pro pozdější odečtení od výsledných hodnot napětí při vyhodnocování výsledků.

## 5. ZÁVĚR

Diplomová práce byla zpracována na téma: „Posouzení plynatosti vybraných slévárenských směsí“. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí (teoretická, experimentální).

V teoretické části práce je proveden komplexní rozbor formovacích a jádrových směsí s ohledem na hlavní složky a na vlastnosti týkající se mechanismu plynatosti. Součástí této kapitoly jsou výpočty, které jsem provedl na základě uplatnění znalostí z oblasti chemie, uvolňujících se plynů při chemických reakcích, které pravděpodobně nejvíce přispívají k plynatosti jádrových a formovacích směsí.

Hlavní část práce – experimentální, byla zaměřena na sledování plynatosti vybraných jádrových směsí a hotových vytvrzených jader.

Poznatky a výsledky z řešení této diplomové práce lze shrnout do těchto dílčích závěrů:

1. Navržené a odzkoušené měřicí zařízení splňuje svou funkci, dobře registruje a zobrazuje časové průběhy plynatostí. Data jsou dále analyzována pomocí vypracovaného programu a navrženého postupu. Na základě zkušeností z provedených měření je možno konstatovat, že maximální hodnota plynatosti je dosažena v časovém okamžiku 120 [s] zahřívání vzorku směsi, dále již zůstává konstantní. Proto je možno provádět měření plynatosti po dobu 120 [s].

2. Navržená metodika měření plynatosti směsí je vhodná, což potvrzují výsledky měření.

3. Výsledky měření plynatosti v této diplomové práci potvrdily předpoklady, že organické látky po zahřátí uvolňují více plynů než anorganické.

4. Nejnižší plynatost vykazovaly vzorky s vodním sklem, označované CT Ostašov, u kterých byla plynatost sledována po dobu 120 [s]. Nejnižší hodnota byla dosažena při teplotě 1200 °C, která činí 1,73 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>.

5. Naopak nejvyšší plynatost vykazovala směs č. 10, označená Hot Box, při teplotě 1200 °C. Hodnota plynatosti je 17,8 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>.

6. Nejnižší plynatost u směsí č. 1 až 6 (syhké komplexní směsi) vykazovala směs č. 4 (označena 15 970) při teplotě 1000 °C. Tato hodnota činí 6,35 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>.

7. Nejvyšší plynatost u směsí č. 1 až 6 (syhké komplexní směsi) vykazovala směs č. 2 (označena 15 947) při teplotě 1000 °C. Tato hodnota činí 14,94 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>.

Pro další měření plynatosti doporučuji získání vzorků jádrových a formovacích směsí se známým složením, popř. se známým obsahem složek.

Z důvodu, že se jedná o základní výzkum a nebyly výsledky plynatosti aplikovány v praxi, není proveden ekonomický přínos této diplomové práce.

## 6. LITERATURA

- [1] KALOUSEK, J., KALOUSKOVÁ, G., HOLUBEC, Z.- Fyzikální chemie metalurgických procesů. [Skripta]. FS,VŠST Liberec 1990.
- [2] PETRŽALA, L.: Slévárenské formovací látky. 1. vyd. Praha 1955.
- [3] RUSÍN, K.: Disperzní formovací materiály. [Skripta]. Praha 1955.
- [4] RUSÍN, K.: Formovací hmoty. [Skripta]. Praha 1972.
- [5] RUSÍN, K.: Teorie slévárenských procesů I, SNTL Praha 1987.
- [6] JELÍNEK, P.: Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí, Ostrava 2004.
- [7] JELÍNEK, P.: Slévárenské formovací směsi – III.část, Vysoká škola Báňská v Ostravě, Ostrava 1984.
- [8] PAVLŮ, K.: Hodnocení plynatosti jádrových směsí používaných ve slévárně LIAZ Liberec. [Diplomová práce], FS-KSM, VŠST Liberec 1983.
- [9] JELÍNEK, P.: Slévárenské formovací směsi – II.část, Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava , 1996.
- [10] PROCHÁZKA, K.: Hodnocení plynatosti formovacích a jádrových směsí používaných ve slévárně LIAZ Liberec. [ Diplomová práce]. FS-KSM, VŠST Liberec 1981.
- [11] BAUEROVÁ M.: Měření plynatosti jádrových směsí s pryskyřičnými pojivy, [Diplomová práce], FS- KSM, VŠST Liberec 1992.
- [12] NOVÁ I.: Tepelné procesy ve slévárenských formách, TU v Liberci 2002.
- [13] NOVÁ I.:Teorie slévání. [Skripta]. FS-KSP, TU v Liberci 2007.
- [14] SEIDL, M.: Sledování plynatosti slévárenských formovacích směsí.Zvláštní číslo časopisu Strojírenská TECHNOLOGIE 2005, str.160-162.
- [15] NOVÁK R.: Vyhodnocení a porovnání plynatosti jádrových směsí používaných ve slévárně LIBEREC a.s. Diplomová práce TU v Liberci, 1995.
- [16] JENČOVSKÝ,M.: Posouzení plynatosti vybrané formovací směsi, Bakalářská práce, TU v Liberci 2006.
- [17] RYŽEKIV, A., SPASSKIJ, Litejnoje proizvodstvo. Moskva 1961.

## Seznam obrázků

OBR. 2-1 SCHÉMA FORMOVACÍ SMĚSI [1] .....	10
OBR. 2-2 SCHÉMA POJIVOVÉHO SYSTÉMU VODA – JÍL [16].....	18
OBR. 2-3 SCHÉMA STRUKTURNÍCH VZORCŮ NOVOLAKOVÝCH PRYSKYŘIC .....	20
OBR. 2-4 SCHÉMA STRUKTURNÍHO VZORCE PRYSKYŘIC REZOLU.....	20
OBR. 2-5 PRVNÍ FÁZE VZNIKU MOČOVINOFORMALDEHYDOVÝCH PRYSKYŘIC .....	20
OBR. 2-6 LINEÁRNÍ ŘETĚZOVITÁ STRUKTURA MEZIPRODUKTU VZNIKU MOČOVINOFORMALDEHYDOVÝCH PRYSKYŘIC .....	21
OBR. 2-7 STRUKTURNÍ CHEMICKÝ VZOREC FURANU ( $C_4H_4O$ ).....	22
OBR. 2-8 ROZLOŽENÍ TEPLIT V PÍSKOVÉ SLÉVÁRENSKÉ FORMĚ S OZNAČENÍM VRSTEV .....	26
OBR. 2-9 ZÁVISLOST MNOŽSTVÍ UVOLNĚNÝCH PLYNŮ NA ČASE[12] .....	28
OBR. 2-10 VLIV SOUČinitele PLYNATOSTI NA RYCHLOST VÝVINU PLYNŮ FORMY[12].	28
OBR. 2-11 VLIV TLOUŠTKY STĚNY ODLITKU NA MNOŽSTVÍ VÝVINU PLYNŮ FORMY [12]	29
OBR. 2-12 GRAFICKÁ ZÁVISLOST OBJEMU PLYNŮ A TEPLITY FORMY NA VZDÁLENOSTI.....	30
OBR. 2-13 SCHÉMATICKÉ NAZNAČENÍ VNIKUTÍ PLYNU DO TAVENINY( $p_F \geq p_m + p_p + p_{pf}$ )[7] .....	38
OBR. 2-14 TLAKOVÉ POMĚRY PŘI VZNIKU PLYNOVÝCH VAD [16] .....	39
OBR. 2-15 SCHÉMA PŘÍSTROJE NA STANOVENÍ PLYNATOSTI FORMOVACÍ SMĚSI [2] .....	43
OBR. 3-1 SKUPINOVÉ SCHÉMA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ PLYNATOSTI [14].....	46
OBR. 3-2 POHLED NA KOMPLEXNĚ ZMODERNIZOVANÉ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ PLYNATOSTI FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍ.....	47
OBR. 3-3 KALIBRACE SNÍMAČE POMOCÍ ZÁTĚŽOVÉ PUMPY AMETEK [16] .....	48
OBR. 3-4 ZÁZNAM KALIBRACE ČIDLA POMOCÍ ZÁTĚŽOVÉ PUMPY AMETEK.....	48
OBR. 3-5 KALIBRAČNÍ KŘIVKA ZJIŠTĚNÁ POMOCÍ ZÁTĚŽOVÉ PUMPY AMETEK .....	49
OBR. 3-6 KALIBRAČNÍ KŘIVKA ZJIŠTĚNÁ POMOCÍ ROZKLADU $CaCO_3$ .....	50
OBR. 3-7 VÁHA LECO EB25 .....	53
OBR. 3-8 ODŘEZANÉ ČÁSTI JÁDRA .....	54
OBR. 3-9 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI SYPKÝCH KOMPLEXNÍCH SMĚSÍ V ZÁVISLOSTI NA ČASE PŘI TEPLITĚ 1000 °C, (SMĚS Č.1, 2, 3, 4, 5 A 6) .....	57
OBR. 3-10 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI FRAKČÍ SYPKÝCH KOMPLEXNÍCH SMĚSÍ O VELIKOSTI ČÁSTIC 0,1 MM V ZÁVISLOSTI NA ČASE PŘI TEPLITĚ 1000 °C, (SMĚS Č.1, 2, 3, 4, 5 A 6).....	58
OBR. 3-11 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI FRAKČÍ SYPKÝCH KOMPLEXNÍCH SMĚSÍ O VELIKOSTI ČÁSTIC 0,15 MM V ZÁVISLOSTI NA ČASE PŘI TEPLITĚ 1000 °C, (SMĚS Č. 1, 2, 3, 4, 5 A 6).....	60
OBR. 3-12 STŘEDNÍ HODNOTY PLYNATOSTI FRAKČÍ SYPKÝCH KOMPLEXNÍCH SMĚSÍ O VELIKOSTI ČÁSTIC 0,30 MM V ZÁVISLOSTI NA ČASE PŘI TEPLITĚ 1000°C, (SMĚS Č.1, 2, 3, 4, 5 A 6).....	61
OBR. 3-13 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI FRAKČÍ SYPKÝCH KOMPLEXNÍCH SMĚSÍ O VELIKOSTI ČÁSTIC 0,40 MM V ZÁVISLOSTI NA ČASE PŘI TEPLITĚ 1000 °C, (SMĚS Č.1, 2, 3, 4, 5 A 6).....	63
OBR. 3-14 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI SMĚSÍ JIŽ HOTOVÝCH JADER Č.7 AŽ Č.11 PŘI TEPLITĚ 800°C .....	64
OBR. 3-15 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI SMĚSÍ JIŽ HOTOVÝCH JADER Č.7 AŽ Č.11 PŘI TEPLITĚ 1000°C .....	66
OBR. 3-16 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI SMĚSÍ JIŽ HOTOVÝCH JADER Č.7 AŽ Č.11 PŘI TEPLITĚ 1200°C .....	67
OBR. 3-17 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI HOTOVÝCH JADER Č.7 CT OSTAŠOV PŘI TEPLITÁCH 800°C,1000°C A 1200°C .....	69
OBR. 3-18 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI HOTOVÝCH JADER Č.8 NOVANOL PŘI TEPLITÁCH 800°C,1000°C A 1200°C .....	70
OBR. 3-19 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI HOTOVÝCH JADER Č.9 COLD BOX PŘI TEPLITÁCH 800°C,1000°C A 1200°C .....	72
OBR. 3-20 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI HOTOVÝCH JADER Č.10 HOT BOX PŘI TEPLITÁCH 800°C,1000°C A 1200°C .....	73



OBR. 3-21 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI HOTOVÝCH JADER Č.11 DORSIL V PŘI TEPLOTÁCH 800°C, 1000°C A 1200°C .....	75
OBR. 3-22 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI VŠECH MĚŘENÝCH SMĚSÍ V ZÁVISLOSTI NA ČASE PŘI TEPLOTĚ 1000 °C, (SMĚS Č.1, 2, 3, 4, 5 , 6, 7, 8, 9,10 A 11) .....	76

## Seznam tabulek

TABULKA 2-1 ROZKLADNÉ TEPLOTY NĚKTERÝCH LÁTEK [5] .....	31
TABULKA 2-2 ORIENTAČNÍ HODNOCENÍ RŮZNÝCH PROCESŮ TVORBY PLYNŮ PROCENTUÁLNĚ Z CELKOVÉHO MNOŽSTVÍ PLYNŮ PŘI LITÍ [5] .....	31
TABULKA 2-3 VÝSLEDKY VÝPOČTŮ UVOLNĚNÝCH PLYNŮ Z UVEDENÝCH REAKCÍ .....	36
TABULKA 3-1 ZJIŠTĚNÉ KALIBRAČNÍ KONSTANTY PRO DANÉ TLAKY POMOCÍ ZÁTĚŽOVÉ PUMPY AMETEK .....	49
TABULKA 3-2 ZJIŠTĚNÉ KALIBRAČNÍ KONSTANTY PRO DANÉ TLAKY POMOCÍ $\text{CaCO}_3$ .....	51
TABULKA 3-3 PŘEHLED VZORKŮ PRO MĚŘENÍ PLYNATOSTI .....	55
TABULKA 3-4 DALŠÍ ZJIŠTĚNÉ HODNOTY VLASTNOSTÍ JEDNOTLIVÝCH SMĚSÍ .....	56
TABULKA 3-5 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI V ZÁVISLOSTI NA ČASE SYPKÝCH KOMPLEXNÍCH SMĚSÍ Č. 1, 2, 3, 4, 5, 6 .....	57
TABULKA 3-6 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI FRAKCÍ SYPKÝCH KOMPLEXNÍCH SMĚSÍ O VELIKOSTI ČÁSTIC 0,1 MM V ZÁVISLOSTI NA ČASE PŘI TEPLOTĚ 1000 °C, (SMĚS Č.1,2,3,4,5 A 6) PRO URČITÉ ČASOVÉ OKAMŽIKY .....	59
TABULKA 3-7 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI FRAKCÍ SYPKÝCH KOMPLEXNÍCH SMĚSÍ O VELIKOSTI ČÁSTIC 0,15 MM V ZÁVISLOSTI NA ČASE PŘI TEPLOTĚ 1000 °C, (SMĚS Č.1,2,3,4,5 A 6) PRO URČITÉ ČASOVÉ OKAMŽIKY .....	60
TABULKA 3-8 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI FRAKCÍ SYPKÝCH KOMPLEXNÍCH SMĚSÍ O VELIKOSTI ČÁSTIC 0,30 MM V ZÁVISLOSTI NA ČASE PŘI TEPLOTĚ 1000 °C, (SMĚS Č.1,2,3,4,5 A 6) PRO URČITÉ ČASOVÉ OKAMŽIKY .....	62
TABULKA 3-9 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI FRAKCÍ SYPKÝCH KOMPLEXNÍCH SMĚSÍ O VELIKOSTI ČÁSTIC 0,40 MM V ZÁVISLOSTI NA ČASE PŘI TEPLOTĚ 1000 °C, (SMĚS Č.1,2,3,4,5 A 6) PRO URČITÉ ČASOVÉ OKAMŽIKY .....	63
TABULKA 3-10 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI SMĚSÍ JIŽ HOTOVÝCH JADER Č.7 AŽ Č.11 PŘI TEPLOTĚ 800°C .....	65
TABULKA 3-11 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI SMĚSÍ JIŽ HOTOVÝCH JADER Č.7 AŽ Č.11 PŘI TEPLOTĚ 1000°C .....	66
TABULKA 3-12 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI SMĚSÍ JIŽ HOTOVÝCH JADER Č.7 AŽ Č.11 PŘI TEPLOTĚ 1200°C .....	67
TABULKA 3-13 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI SMĚSI Č.7 CT OSTAŠOV PŘI TEPLOTÁCH 800°C, 1000°C A 1200°C .....	69
TABULKA 3-14 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI SMĚSI Č.8 NOVANOL PŘI TEPLOTÁCH 800°C, 1000°C A 1200°C .....	71
TABULKA 3-15 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI SMĚSI Č.9 COLD BOX PŘI TEPLOTÁCH 800°C, 1000°C A 1200°C .....	72
TABULKA 3-16 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI SMĚSI Č.10 HOT BOX PŘI TEPLOTÁCH 800°C, 1000°C A 1200°C .....	74
TABULKA 3-17 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PLYNATOSTI SMĚSI Č.11 DORSIL V PŘI TEPLOTÁCH 800°C, 1000°C A 1200°C .....	75

## Seznam příloh

PŘÍLOHA Č. 1	GRANULOMETRICKÁ SKLADBA OSTŘIVA
PŘÍLOHA Č. 2	DETAILNÍ POPIS SOUČÁSTÍ POUŽITÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ
PŘÍLOHA Č. 3	OBRAZKY SLEDOVANÝCH VZORKŮ
PŘÍLOHA Č. 4	VÝPOČTY OBJEMŮ UVOLŇOVANÝCH PLYNŮ
PŘÍLOHA Č. 5	STATISTICKÉ VÝPOČTY A HODNOTY NAMĚŘENÝCH HODNOT

## **PŘÍLOHY**

## Příloha č. 1 Granulometrická skladba ostřiva

Pro posouzení vlastností formovacích směsí je také důležitá granulometrická skladba ostřiva. Čisté ostřivo se prosévá řadou sít, která jsou na speciálním zařízení. Obrázky tohoto zařízení a obrázky jednotlivých sít jsou v této příloze. Pro naše potřeby a určení granulometrické skladby používáme navážku 50g směsi. Ostřivo je zbavené vyplavitelných podílů, tj. částic < 0,02 mm, což mohou být jíly, živce, prachové podíly; prachové podíly se zbavují zkouškou vyplavitelnosti. Síta mají velikost ok 0,06; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6; 1,0; 1,5. Tato zkouška se nazývá také síťový rozbor. Sledují se podíly zachycené na jednotlivých sítích a vyjadřují se v procentech původní navážky.

Součtová křivka je uvedena na obrázku v této příloze, kreslí se v semilogaritmických souřadnicích. Na svislou osu se nanáší procenta ostřiva zachycená na jednotlivých sítích [%]. Na vodorovnou osu, která má logaritmickou stupnici, se nanáší velikost ok sít [mm]. Průsečík součtové křivky s přímkou označující kritickou velikost částice - ostřiva (0,02 mm) je bod vyznačující 100 % ostřiva. Tuto 100 % část rozdělíme na úseky vymezující 25, 50, 75 % a k těmto hodnotám přiřadíme na vodorovné odpovídající velikosti zrna, jež označíme  $d_{25}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{75}$ .

Tabulka vyznačuje příklad výpočtu granulometrické skladby ostřiva

<b>Třída zrnitosti [mm]</b>	<b>Hmotnost frakcí [g]</b>	<b>Celkové množství ostřiva zachycené na jednotlivých sítích [%]</b>
<b>1,5</b>	0,43	$0,43 \cdot 100 / 100 = 0,43$ [%]
<b>1,5 - 1,0</b>	0,74	$(0,43 + 0,74) \cdot 100 / 100 = 1,17$ [%]
<b>1,0 - 0,6</b>	5,61	$(0,43 + 0,74 + 5,61) \cdot 100 / 100 = 6,78$ [%]
<b>0,6 - 0,3</b>	34,27	$(0,43 + 0,74 + 5,61 + 34,27) \cdot 100 / 100 = 41,05$ [%]
<b>0,3 - 0,2</b>	34,02	$(0,43 + 0,74 + 5,61 + 34,27 + 34,02) \cdot 100 / 100 = 75,07$ [%]
<b>0,2 - 0,1</b>	20,80	$(0,43 + 0,74 + 5,61 + 34,27 + 34,02 + 20,80) \cdot 100 / 100 = 97,31$ [%]
<b>0,1 - 0,06</b>	1,44	$(0,43 + 0,74 + 5,61 + 34,27 + 34,02 + 20,80 + 1,44) \cdot 100 / 100 = 97,31$ [%]
	0,94	$(0,43 + 0,74 + 5,61 + 34,27 + 34,02 + 20,80 + 1,44 + 0,94) \cdot 100 / 100 =$

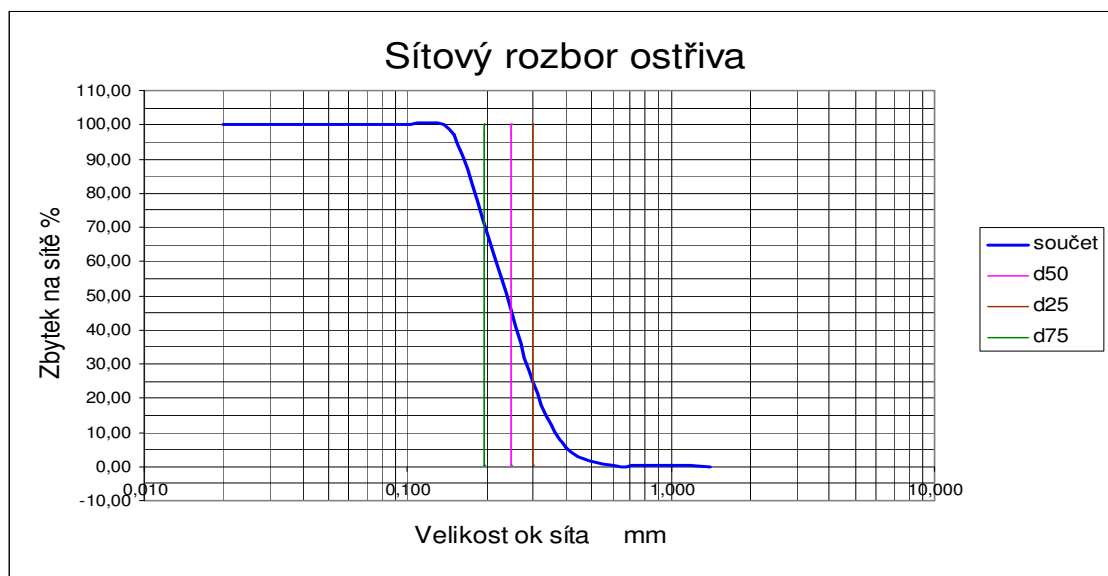
0,06 - <b>0,02</b>		98,25 [%]
Celkem:	98,25 g	1,75 g jsou vyplavitelné látky

$d_{50}$  - velikost středního zrna (je to myšlená velikost ok síta, na kterém se zachytí 50 % daného ostřiva);

$d_{25}$  - je to myšlená velikost ok síta, na kterém se zachytí 25 % daného ostřiva;

$d_{75}$  - je to myšlená velikost ok síta, na kterém se zachytí 75 % daného ostřiva.

Součtová křivka pro síťový rozbor



Na základě síťového rozboru se ostřivo hodnotí:

- podle velikosti středního zrna ( $d_{50}$ );
- podle pravidelnosti zrnitosti, neboli stupně stejnoměrnosti ( $s = d_{75}/d_{25}$ ).

Čím je hodnota  $s = d_{75}/d_{25}$  bližší 1, tím jsou zrna ostřiva stejnoměrnější a součtová křivka je strmější. S klesající hodnotou  $s$  je součtová křivka plošší a zrna ostřiva jsou velikostně různorodá.

Charakter a tvar zrn ostřiva má velký vliv na technologické vlastnosti formovacích směsí. Ostřiva kulatá jsou lépe zpěchovatelná, tím má formovací směs i větší tekutost, avšak větší náchylnost na vznik vad odlitku - zálupů. Proto je vhodnější pro syntetické bentonitové směsi je ostřivo poloostrohranné se sníženou možností spěchování.

### **Pokračování Příloha č. 1**

U jádrových směsí je tomu naopak. Kulatá zrna ostřiva s hladkým povrchem se lépe povlékají vrstvou olejového nebo pryskyřičného pojiva. Ve spěchované směsi kulatá zrna ostřiva vytvářejí více kontaktních míst a směs dosahuje vyšší pevnosti po vysušení, než formovací směs s ostrohranným ostřivem. Kulatý tvar ostřiva sníží spotřebu jádrového pojiva o 0,5 až 1,0 %.



Přístroj na sítový rozbor.

**Pokračování Příloha č. 1**



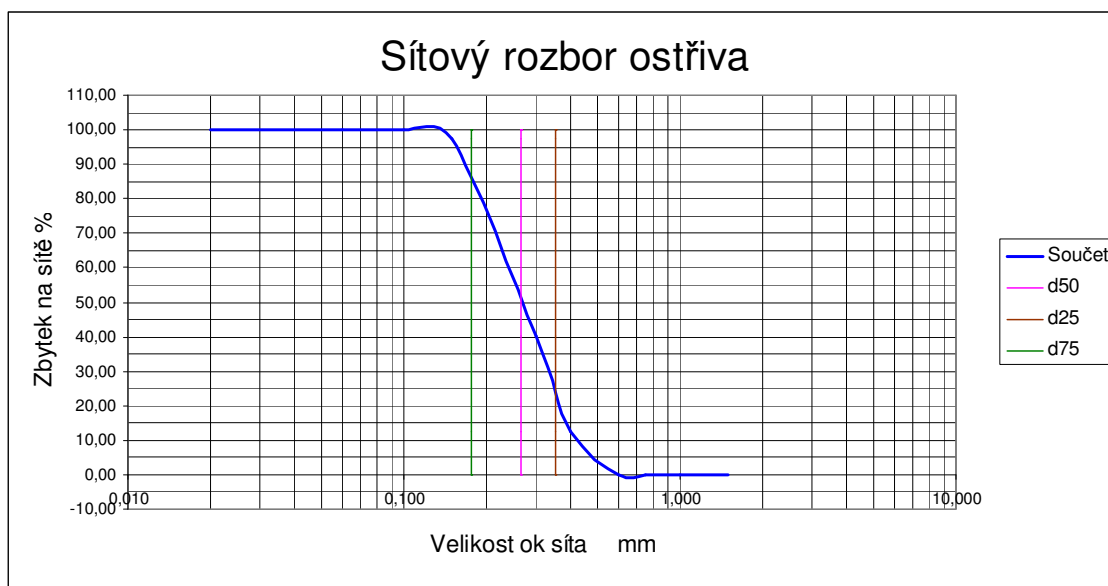
Soubor použitých sít .

## Pokračování Příloha č. 1

### Sítové rozbor měřených jádrových ostřiv

#### Směs 15970

Hodnoty sítového rozboru směsi 15970					
Sítový rozbor	č.1	č.2	č.3	č.4	Průměrné hodnoty
1,5	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
0,75	0	0	0	0	0
0,6	0,05	0,05	0,1	0,1	0,075
0,4	6,45	6,1	6,1	6,0	6,1625
0,3	14,15	13,8	13,7	13,7	13,8375
0,15	27,8	28,4	28,65	28,65	28,375
0,1	1,2	1,4	1,4	1,5	1,375
0,06	0	0	0	0	0
0,02	0	0	0	0	0
Datum	18.10.2006	18.10.2006	18.10.2006	18.10.2006	-
Čas	8:50	10:43	11:29	11:50	-



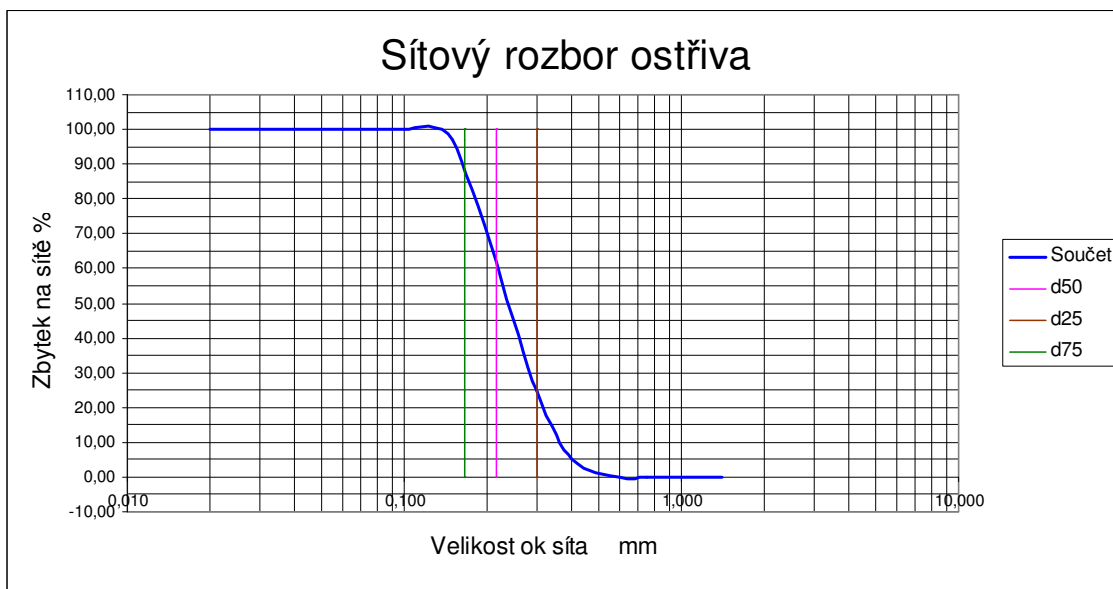
$S_{th}$ Teoretický povrch $cm^2/g$ :	85,77
$MK_{calc}$ Střední velikost zrn mm	0,282
$d_{50}$ mm:	0,265
$d_{75}$ mm:	0,175
$d_{25}$ mm:	0,355



# Pokračování Příloha č. 1

## směs 20020

Hodnoty síťového rozboru směsi 20020			
Sítový rozbor	č.1	č.2	Průměrné hodnoty
1,5	0	0	0
1	0	0	0
0,75	0,05	0	0,05
0,6	0,1	0,05	0,075
0,4	4,6	4,5	4,55
0,3	8,5	8,65	8,575
0,15	31,8	31,5	31,65
0,1	4,4	4,5	4,45
0,06	0	0	0
0,02	0,3	0,3	0,3
Datum	20.10.2006	20.10.2006	-
Čas	8:00	9:30	-

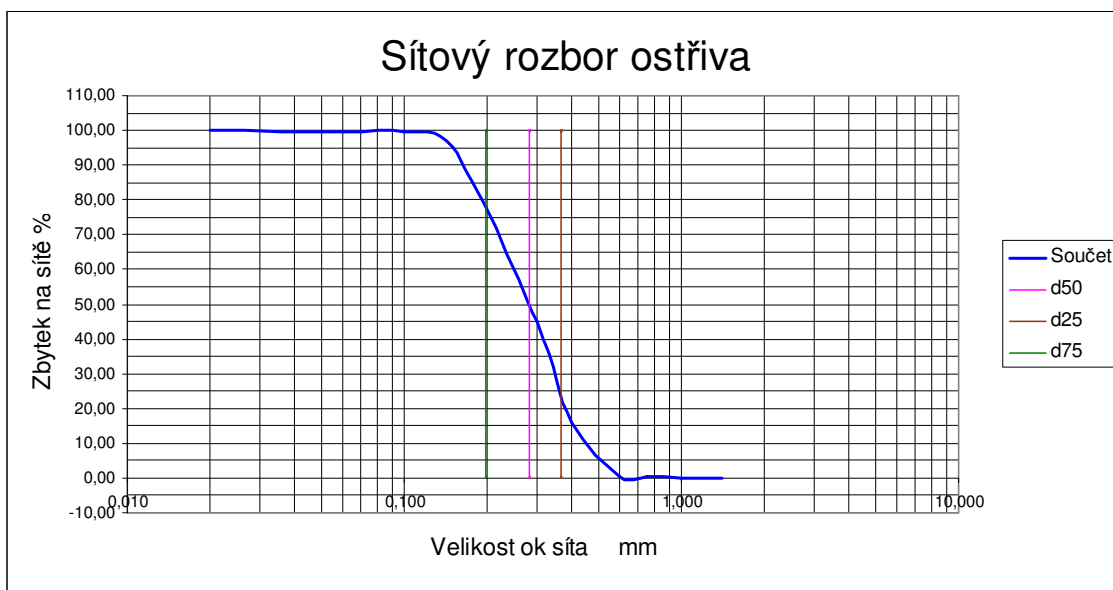


S <sub>th</sub> Teoretický povrch cm <sup>2</sup> /g:	99,02
MK <sub>calc</sub> Střední velikost zrn mm	0,253
d <sub>50</sub> mm:	0,214
d <sub>75</sub> mm:	0,165
d <sub>25</sub> mm:	0,30

**Pokračování Příloha č. 1**

**směs 15731**

Hodnoty síťového rozboru směsi 15731			
Sítový rozbor	č.1	č.2	Průměrné hodnoty
1,5	0	0	0
1	0	0	0
0,75	0,1	0	0,1
0,6	0,2	0,1	0,15
0,4	7,75	7,7	7,725
0,3	14,65	14,3	14,475
0,15	24,9	25,3	25,1
0,1	2,3	2,2	2,25
0,06	0	0	0
0,02	0,1	0	0,1
Datum	11.10.2006	11.10.2006	-

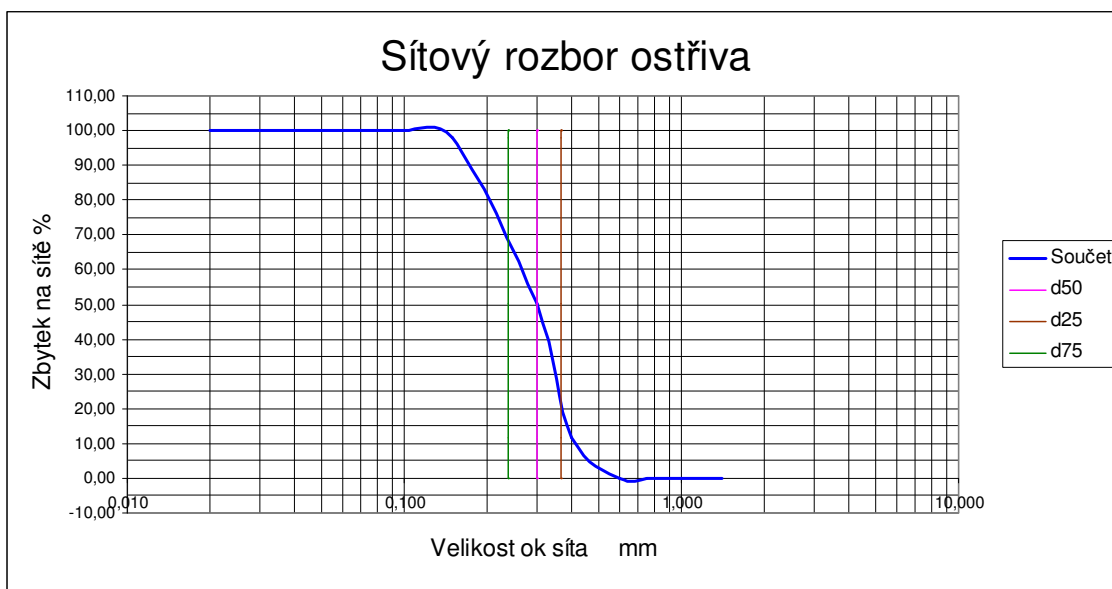


$S_{th}$ Teoretický povrch $cm^2/g$ :	85,69
$MK_{calc}$ Střední velikost zrn mm	0,292
$d_{50}$ mm:	0,283
$d_{75}$ mm:	0,197
$d_{25}$ mm:	0,369

Pokračování Příloha č. 1

**směs 15994**

Hodnoty síťového rozboru směsi 15994					
Sítový rozbor	č.1	č.2	č.3	č.4	Průměrné hodnoty
<b>1,5</b>	0	0	0	0	0
<b>1</b>	0	0	0	0	0
<b>0,75</b>	0	0	0	0	0
<b>0,6</b>	0	0	0	0	0
<b>0,4</b>	6,0	5,6	5,8	6,0	5,85
<b>0,3</b>	19,5	18,9	19,3	18,95	19,1625
<b>0,15</b>	23,05	24	23,6	23,5	23,53
<b>0,1</b>	1,1	1,2	1,1	1,1	1,125
<b>0,06</b>	0	0	0	0	0
<b>0,02</b>	0	0	0	0	0
Datum	12.10.2006	12.10.2006	12.10.2006	12.10.2006	-
Čas	8:00	9:00	11:30	12:00	-

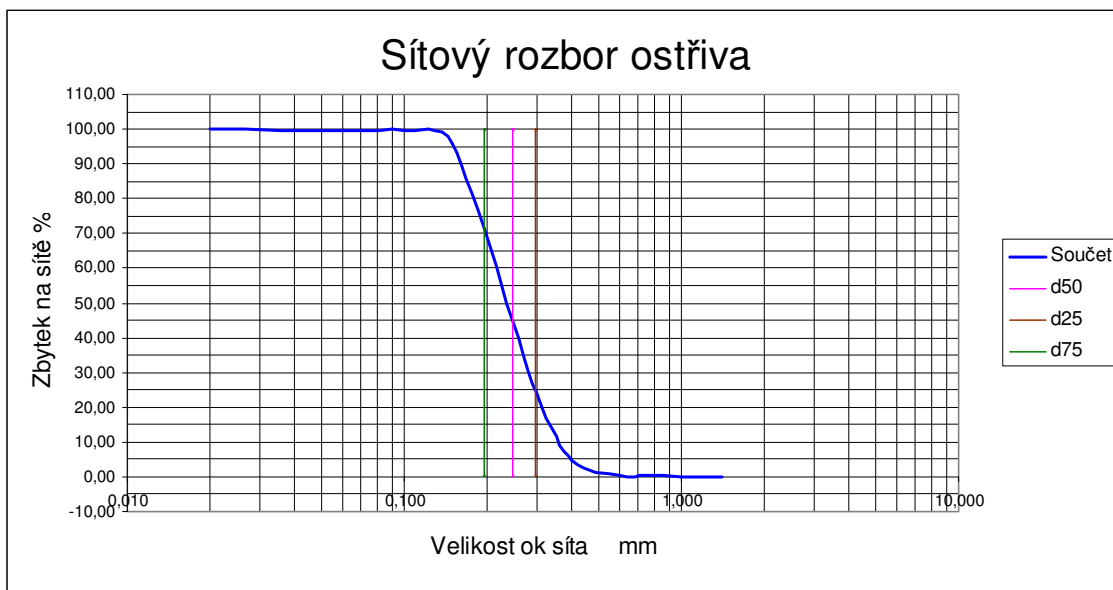


$S_{th}$ Teoretický povrch $cm^2/g$ :	81,92
$MK_{calc}$ Střední velikost zrn mm	0,295
$d_{50}$ mm:	0,301
$d_{75}$ mm:	0,236
$d_{25}$ mm:	0,366

Pokračování Příloha č. 1

**směs TPR 210 F**

Hodnoty síťového rozboru směsi TPR 210 F				
Sítový rozbor	č.1	č.2	č.3	Průměrné hodnoty
<b>1,5</b>	0	0	0	0
<b>1</b>	0	0	0	0
<b>0,75</b>	0,1	0	0	0,1
<b>0,6</b>	0,1	0	0	0,1
<b>0,4</b>	2,4	1,9	2,1	2,133
<b>0,3</b>	10,4	8,7	9,4	9,5
<b>0,15</b>	34,9	36,35	35,4	35,55
<b>0,1</b>	1,6	2,1	2,0	1,9
<b>0,06</b>	0	0	0	0
<b>0,02</b>	0	0,2	0,1	0,15
Datum	10.11.2006	10.11.2006	10.11.2006	-
Čas	9:00	9:33	10:00	-

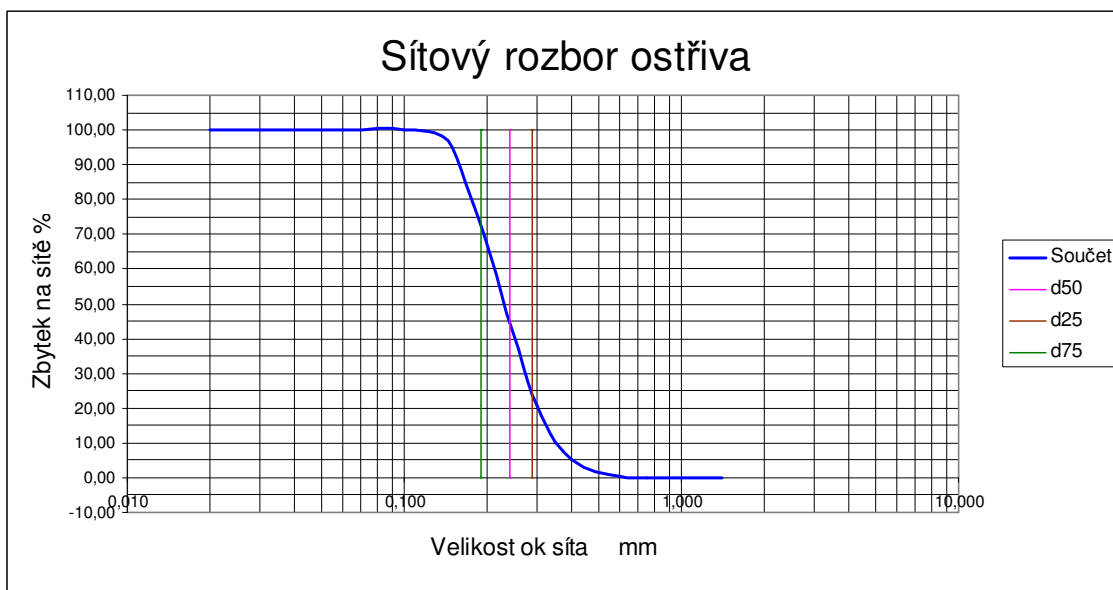


$S_{th}$ Teoretický povrch $cm^2/g$ :	95,38
$MK_{calc}$ Střední velikost zrn mm	0,248
$d_{50}$ mm:	0,246
$d_{75}$ mm:	0,193
$d_{25}$ mm:	0,298

**Pokračování Příloha č. 1**

**směs 15947**

Hodnoty síťového rozboru směsi 15947				
Sítový rozbor	č.1	č.2	č.3	Průměrné hodnoty
<b>1,5</b>	0	0	0	0
<b>1</b>	0	0	0	0
<b>0,75</b>	0,1	0,05	0,1	0,083
<b>0,6</b>	0,05	0,1	0,05	0,066
<b>0,4</b>	2,5	2,25	2,5	2,416
<b>0,3</b>	8,0	7,5	7,75	7,75
<b>0,15</b>	36,5	37,2	36,9	36,8
<b>0,1</b>	2,6	2,7	2,6	2,63
<b>0,06</b>	0	0	0	0
<b>0,02</b>	0	0	0	0
Datum	2.11.2006	2.11.2006	2.11.2006	-
Čas	10:30	10:50	11:30	-



$S_{th}$ Teoretický povrch $cm^2/g$ :	96,21
$MK_{calc}$ Střední velikost zrn mm	0,244
$d_{50}$ mm:	0,241
$d_{75}$ mm:	0,190
$d_{25}$ mm:	0,291

## **Příloha č. 2     Detailní popis součástí použitého měřicího zařízení**

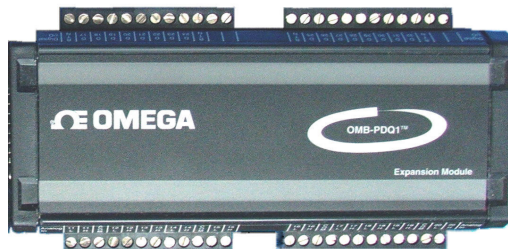
### *Tlakové čidlo měřicí soustavy*



Tlakové čidlo PXM02MC-160mBARG5T

Tlakové čidlo PXM02MC-160mBARG5T (obr. 3.3) je čidlo, které odpovídá požadavkům na snímání tlaku uvolňujících se plynů. Vyznačuje se vysokou přesností, rozsah měření je 0 – 160 mbar. Je napájeno 24 – 32 Vdc zdrojem. Lze pomocí konektoru jednoduše připojit ke sběrnici dat (obr.3.4) a tím zjednodušit přenos dat do PC.

### *Sběrnice dat OMB-DAQ-56*



Sběrnice dat OMB-DAQ-56

## **Pokračování Příloha č. 2**

Sběrnice dat OMB-DAQ-56 je univerzální sběrnice (viz obr.3.4) pro sběr dat, kterou lze připojit pomocí univerzální sériové linky téměř ke každému osobnímu počítači. Vyznačuje se vysokou přesností s 22-bitovým rozlišením. K sběrnici lze pro přímé měření připojit napěťové, frekvenční, pulzní, termočláňkové a digitální vstupy. Jednoduchým připojením k PC pomocí kabelu je zajištěn jak rychlý přenos dat, tak i napájení jednotlivých modulů. Univerzální sériová linka USB slouží pro spojení osobního počítače (notebooku) se sběrnicemi. Systém OMB-DAQ-56 překonává různá omezení zejména PCMCIA karet. Systém OMB-DAQ-56 má 20 jednoduchých, nebo 10 diferenčních analogových, nebo termočláňkových vstupů, 8 digitálních V/V kanálů a 2 frekvenční kanály.

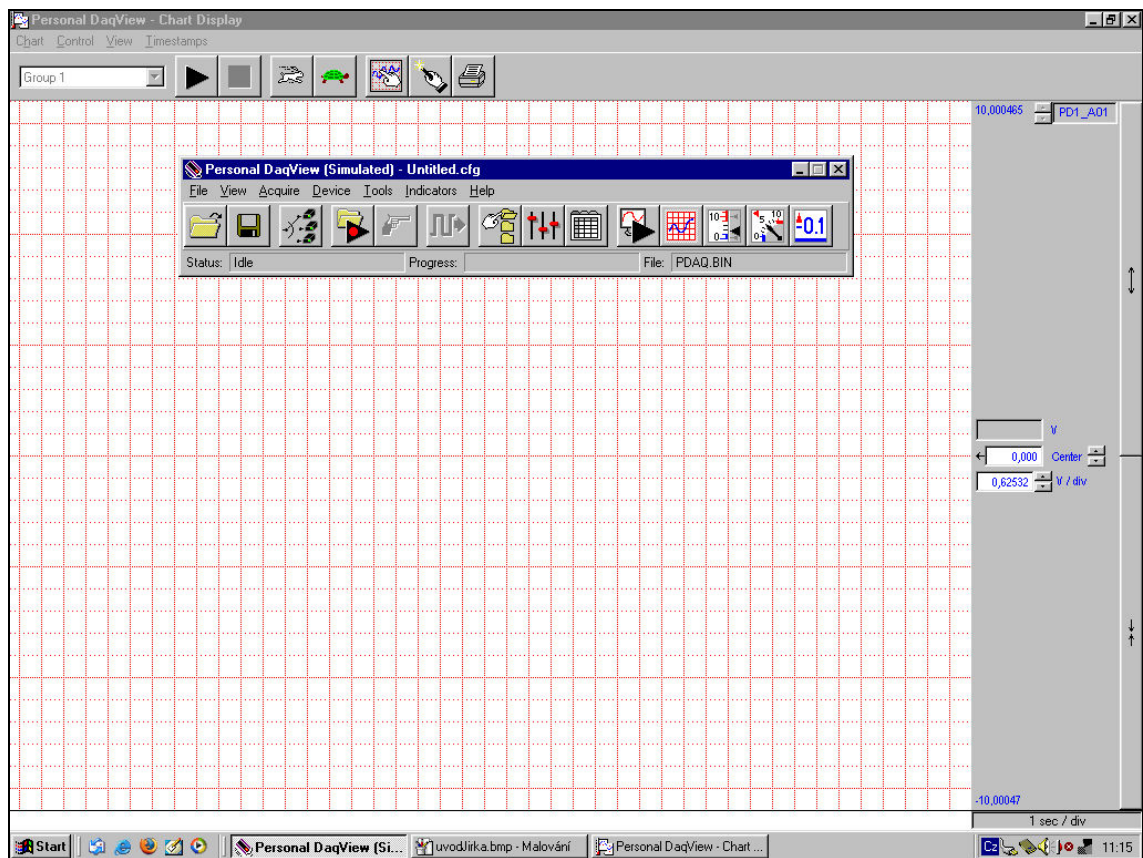
### ***Popis použitého ovládacího programu DaqView pro sběrnici OMB-DAQ-56***



Úvodní obrazovka programu DaqView

Tento program zpracovává data ze sběrnice QMB-DAQ-56. Pro správnou funkci je nejprve nutné nastavit správný kanál, ze kterého sběrnice data vysílá a vhodně nastavit meze a intervaly měřených hodnot. Také je nutné nastavit časový interval měření. My jsme použili snímání po 1s a u některých vzorků pro posouzení pětikrát za sekundu. Program ukládá hodnoty napětí v zadaných časových úsecích. Pro kontrolu funkce a pro představu lze spustit grafický displej kde se zaznamenávané hodnoty přímo vykreslují do grafu. Program také umí předem nastavit čas měření. Po uplynutí tohoto času sám ukládání dat zastaví a uloží data na předem vybrané místo na disku počítače jako datový soubor, který pak lze snadno použít pro další výpočty nebo tvorbu grafů v tomu určených programech.

## Pokračování Příloha č. 2



Pracovní obrazovka programu DaqView



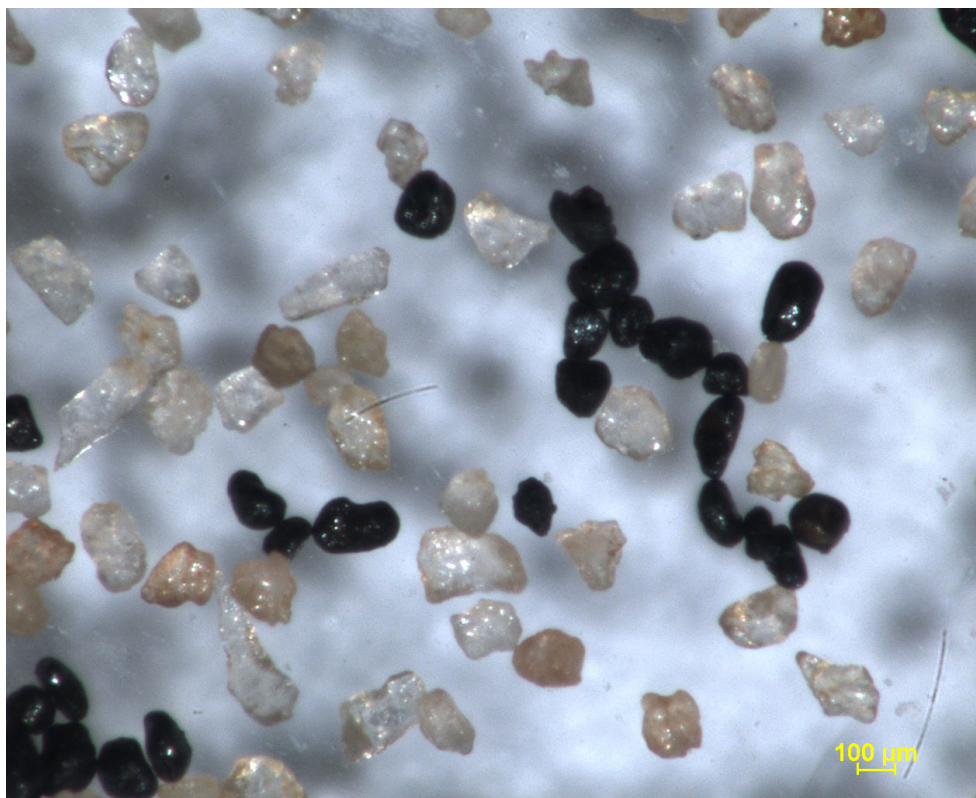
### **Příloha č. 3      Obrázky sledovaných vzorků**

Obrázky sledovaných sypkých směsí jsou seřazeny za sebou, vždy od jedné směsi. První snímek každé směsi je pohled na komplexní směs se všemi součástmi. Další snímky obsahují jednotlivé frakce, vždy příslušné dané směsi. U jednotlivých fotografií je popisek s označením čísla směsi a příslušné frakce. Směsi jsou řazeny postupně dle tabulky 3-1 Přehled slévárenských směsí použitých pro měření plynatosti.

Směs č. 1 - 15731



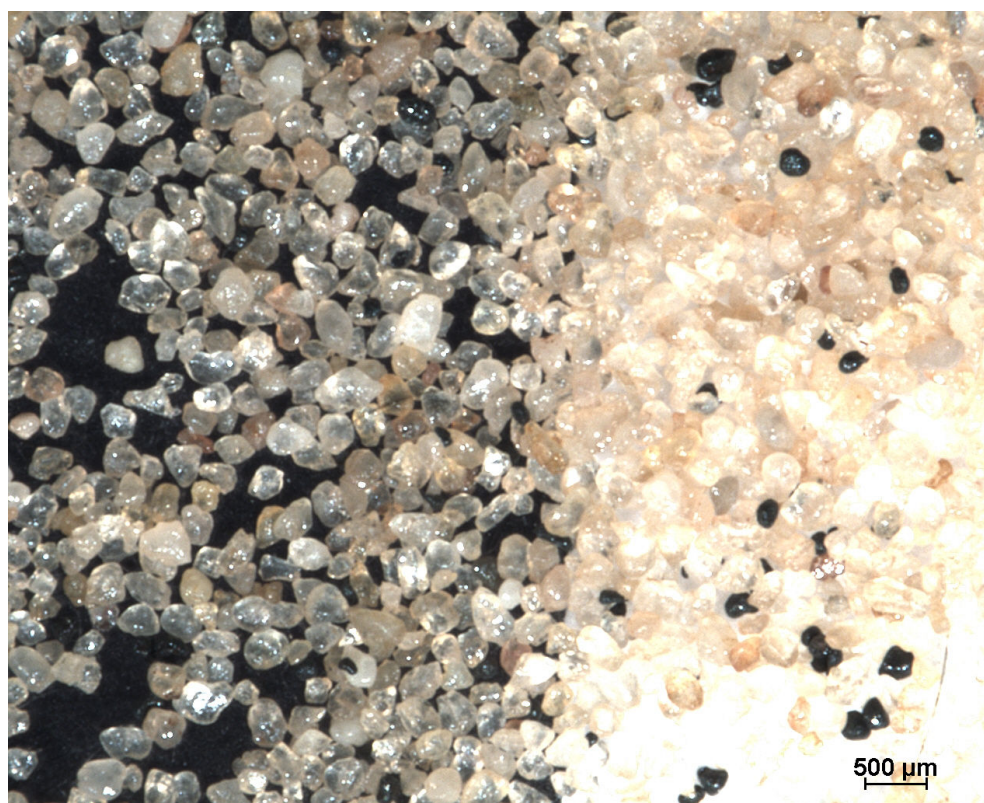
Číslo směsi 1: 15731 kompletní směs



Číslo směsi 1: 15731 frakce 0,1 mm



**Pokračování Příloha č. 3**



Číslo směsi 1: 15731 frakce 0,15 mm



Číslo směsi 1: 15731 frakce 0,3 mm



**Pokračování Příloha č. 3**



Číslo směsi 1: 15731 frakce 0,4 mm

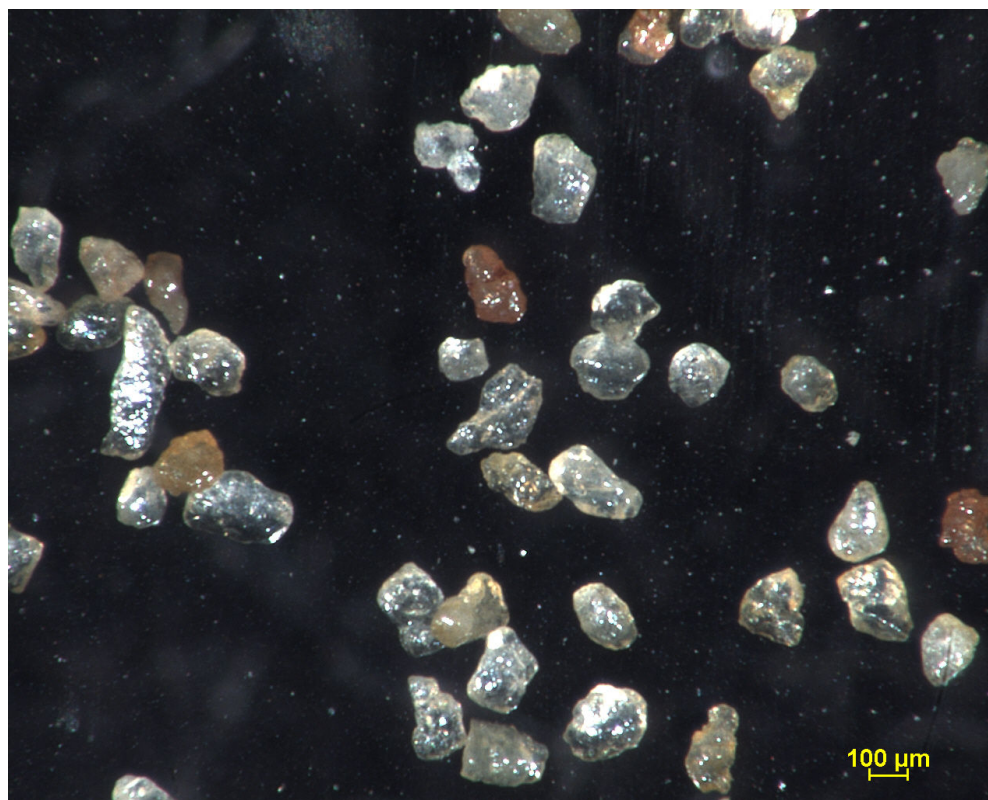
**Směs č.2 – 15947**



Číslo směsi 2: 15947 kompletní směs



**Pokračování Příloha č. 3**



Číslo směsi 2: 15947 frakce 0,1 mm



Číslo směsi 2: 15947 frakce 0,15 mm



**Pokračování Příloha č. 3**



Číslo směsi 2: 15947 frakce 0,3 mm



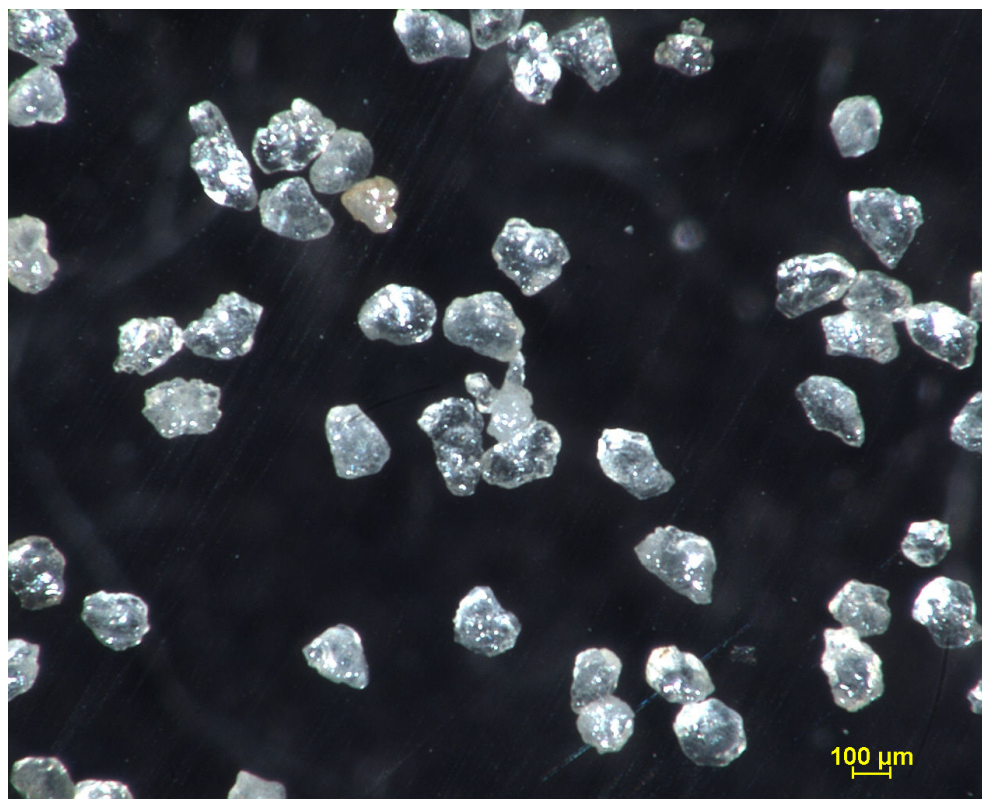
Číslo směsi 2: 15947 frakce 0,4 mm



**Směs č.3 – 15xxx**



Číslo směsi 3: 15xxx kompletní směs



Číslo směsi 3: 15xxx frakce 0,1 mm



**Pokračování Příloha č. 3**



Číslo směsi 3: 15xxx frakce 0,15 mm



Číslo směsi 3: 15xxx frakce 0,3 mm



**Pokračování Příloha č. 3**



Číslo směsi 3: 15xxx frakce 0,4 mm

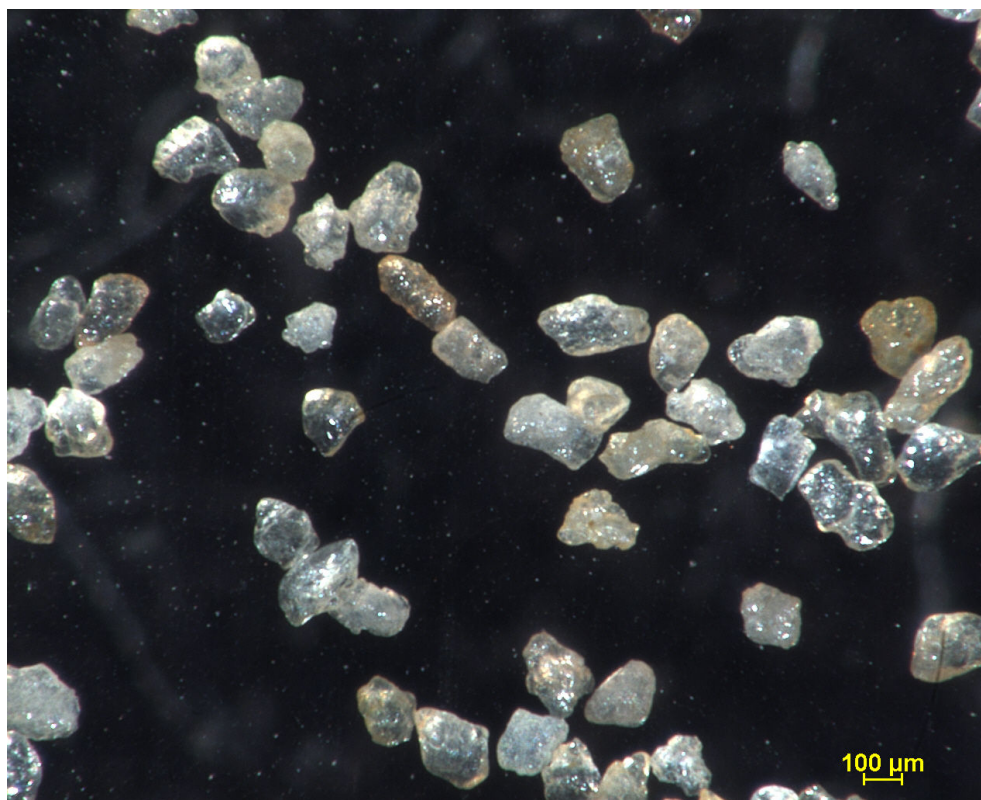
**Směs č.4 – 15970**



Číslo směsi 4: 15970 kompletní směs



**Pokračování Příloha č. 3**



Číslo směsi 4: 15970 frakce 0,1 mm



Číslo směsi 4: 15970 frakce 0,15 mm



**Pokračování Příloha č. 3**



Číslo směsi 4: 15970 frakce 0,3 mm



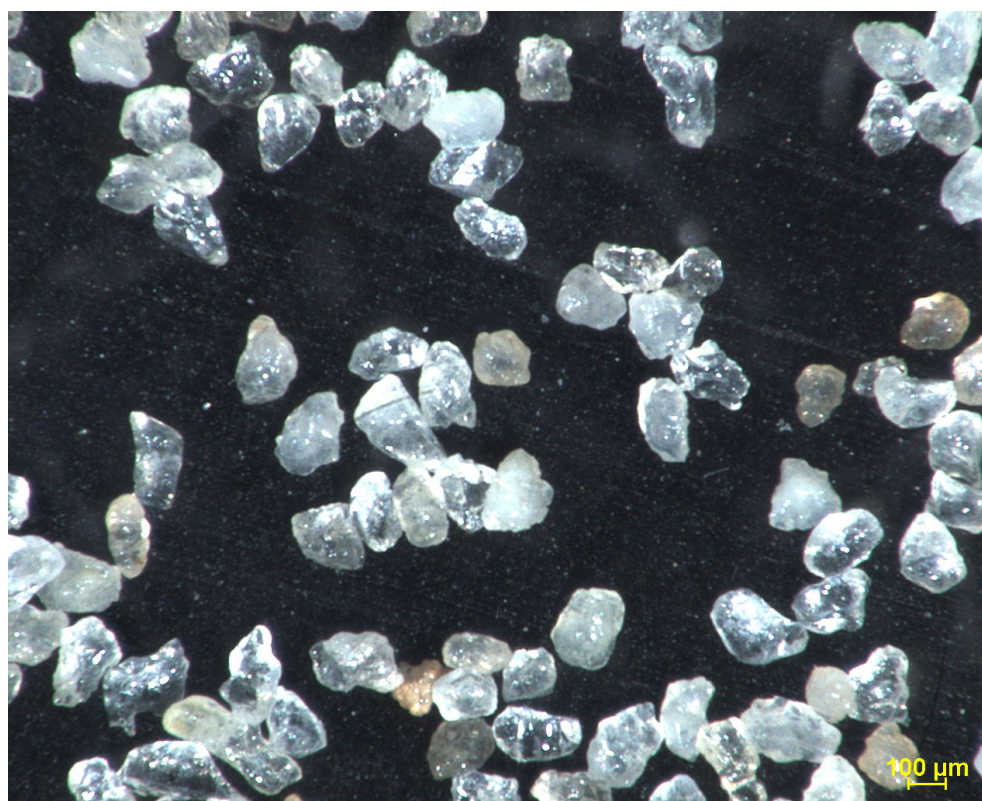
Číslo směsi 4: 15970 frakce 0,4 mm



Směs č.5 – 15994



Číslo směsi 5: 15994 kompletní směs



Číslo směsi 5: 15970 frakce 0,1 mm



**Pokračování Příloha č. 3**



Číslo směsi 5: 15970 frakce 0,15 mm



Číslo směsi 5: 15970 frakce 0,3 mm



**Pokračování Příloha č. 3**



Číslo směsi 5: 15970 frakce 0,4 mm

**Směs č.6 – TPR 210 F**



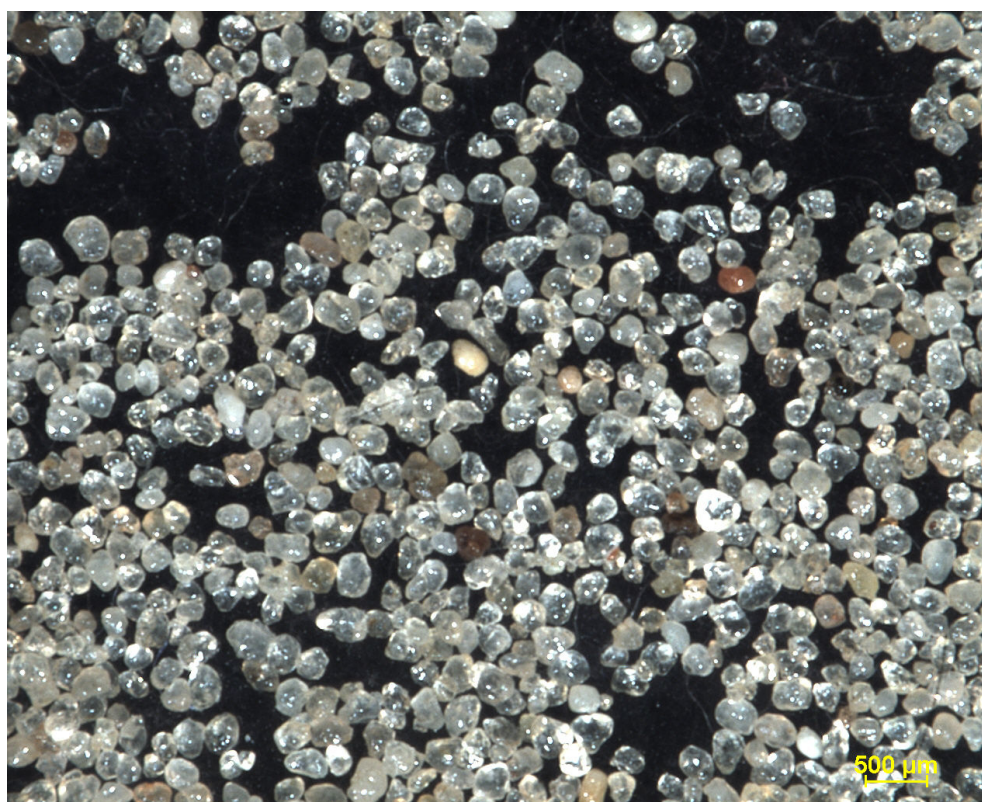
Číslo směsi 6: TPR 210 F kompletní směs



**Pokračování Příloha č. 3**



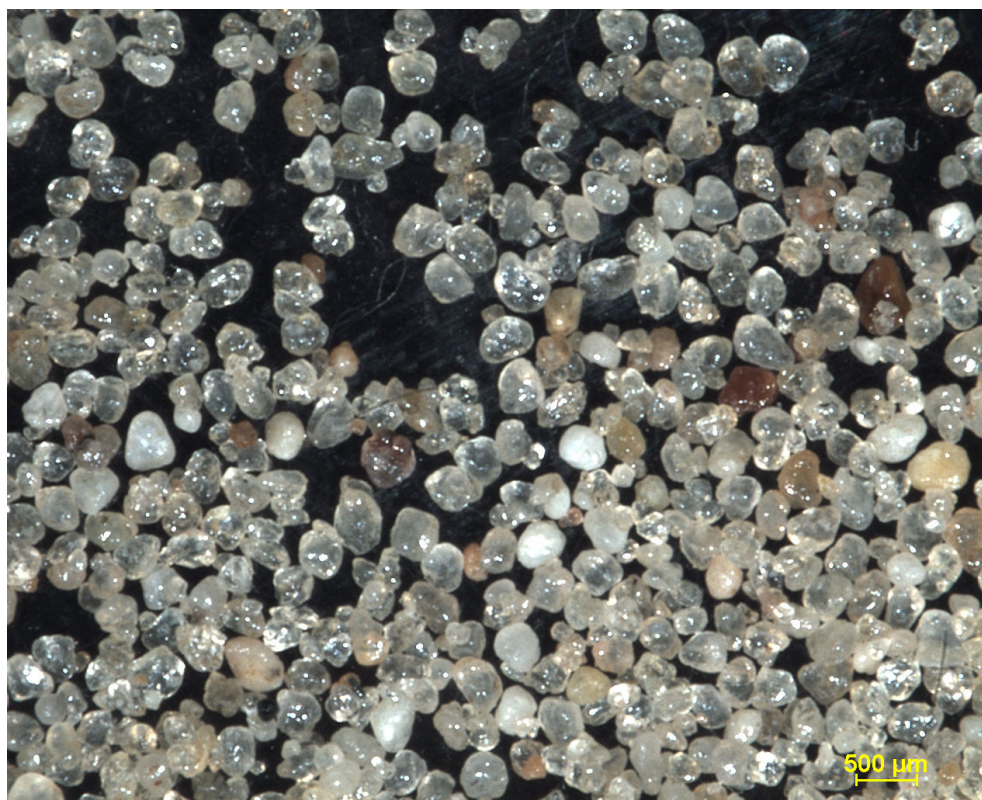
Číslo směsi 6: TPR 210 F frakce 0,1 mm



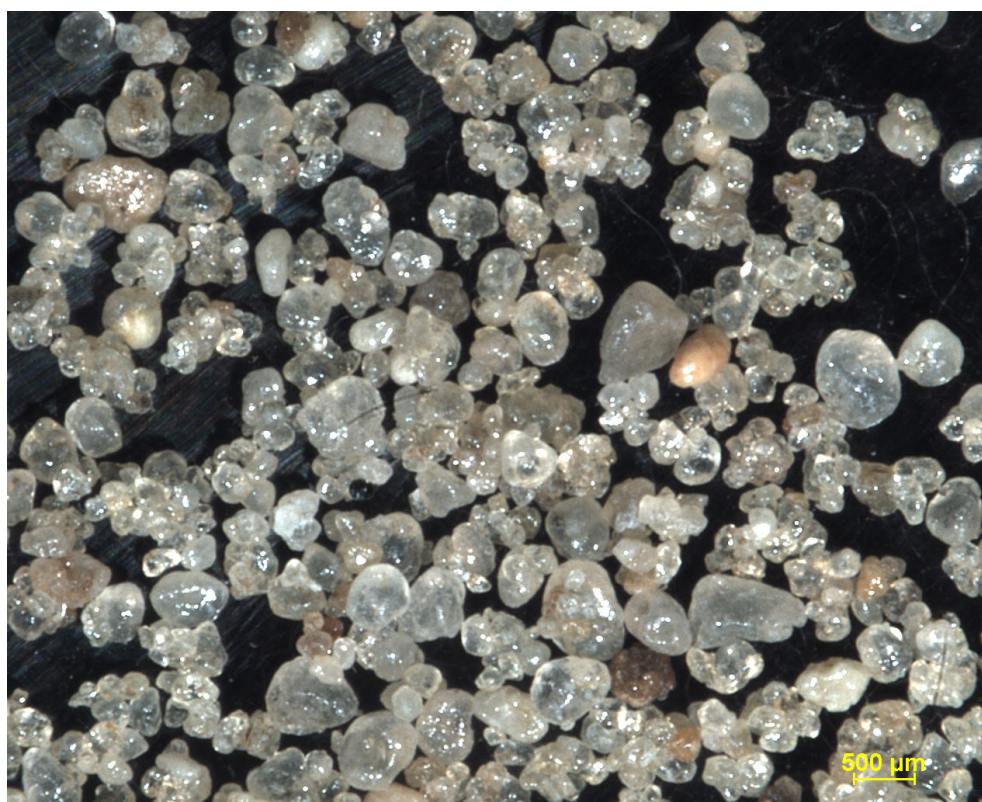
Číslo směsi 6: TPR 210 F frakce 0,15 mm



**Pokračování Příloha č. 3**



Číslo směsi 6: TPR 210 F frakce 0,3 mm



Číslo směsi 6: TPR 210 F frakce 0,4 mm



## Příloha č. 4 Výpočty objemů uvolňovaných plynů

(pro rovnice uvedené v tab.č. 2-3 v kapitole 2.2.2 )

Vzorce potřebné k výpočtu:

$$n = \frac{m}{M}; n = \frac{V}{V_n};$$

Látkové množství – n [mol] ;

Hmotnost – m [g] ;

Objem – V [dm<sup>3</sup>] ;

Univerzální měrná plynová konstanta-  $V_m = 22,41$  [dm<sup>3</sup> . mol<sup>-1</sup>];

Relativní molekulová hmotnost – M [g.mol<sup>-1</sup> ],

$M = x$  [g.mol<sup>-1</sup> ] (*C – 12,01; O<sub>2</sub>-31,999; CO<sub>2</sub>- 44,010; CO-28,01; H<sub>2</sub>O-18,015; H<sub>2</sub>-2,0158; Fe-55,847; FeO-71,8469; Fe<sub>3</sub>O-183,54; CH<sub>4</sub>- 16,0426; CaCO<sub>3</sub>- 100,088; CaO- 56,0799*);

<b>C (s) + O<sub>2</sub> (g) <math>\longleftrightarrow</math> CO<sub>2</sub> (g)</b>	<b>z 1 g C(s) vznikne 1,8666 dm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> (g)</b>
--	--

$$n_C = n_{CO_2}; \frac{m_C}{M_C} = \frac{m_{CO_2}}{M_{CO_2}} = \frac{V_{CO_2}}{V_m}; V_{CO_2} = \frac{V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{22,4 \cdot 1}{12} = 1,8666 \text{ dm}^3 \text{ CO}_2 \text{ (g)};$$

<b>2C (s) + O<sub>2</sub> (g) <math>\longleftrightarrow</math> 2CO (g)</b>	<b>z 1 g C(s) vznikne 1,8666 dm<sup>3</sup> CO (g)</b>
--	--

$$\frac{n_C}{2} = \frac{n_{CO}}{2}; \frac{m_C}{M_C} = \frac{m_{CO}}{M_{CO}} = \frac{V_{CO}}{V_m}; V_{CO} = \frac{V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{22,4 \cdot 1}{12} = 1,8666 \text{ dm}^3 \text{ CO (g)};$$

<b>C (s) + CO<sub>2</sub> (g) <math>\longleftrightarrow</math> 2CO (g)</b>	<b>z 1 g C(s) vznikne 3,73 dm<sup>3</sup> CO (g)</b>
--	--

$$n_C = \frac{n_{CO}}{2}; \frac{m_C}{M_C} = \frac{V_{CO}}{2 \cdot V_m}; V_{CO} = \frac{2 \cdot V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{44,8 \cdot 1}{12} = 3,73 \text{ dm}^3 \text{ CO (g)};$$

<b>C (s) + H<sub>2</sub> O (g) <math>\longleftrightarrow</math> CO (g) + H<sub>2</sub> (g)</b>	<b>Z 1g C(s) vznikne 3,73 dm<sup>3</sup> směsi plynů CO(g) a H<sub>2</sub>(g).</b>
--	--

$$n_C = \frac{V_{CO}}{V_m}; n_C = \frac{V_{H_2}}{V_m}; V_{CO} = \frac{V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{22,4}{12} = 1,866 \text{ dm}^3 \text{ CO (g)};$$

$$V_{H_2} = \frac{V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{22,4}{12} = 1,866 \text{ dm}^3 \text{ H}_2 \text{ (g)};$$

$$V_{celk.} = V_{CO} + V_{H_2} = 1,866 + 1,866 = 3,732 \text{ dm}^3 \text{ směsi plynů CO(g) a H}_2 \text{ (g).}$$

#### Pokračování Příloha č. 4

$\text{C (s)} + 2\text{H}_2 \text{O (g)} \longleftrightarrow \text{CO}_2 \text{ (g)} + 2\text{H}_2 \text{ (g)}$	<b>z 1g C(s) vznikne 5,598 dm<sup>3</sup> směsi plynů CO<sub>2</sub>(g) a H<sub>2</sub>(g).</b>
---	---

$$n_{\text{C}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_m}; \quad n_{\text{C}} = \frac{V_{\text{H}_2}}{V_m}; \quad V_{\text{CO}_2} = \frac{V_m \cdot m_{\text{C}}}{M_{\text{C}}} = \frac{22,4}{12} = 1,866 \quad \text{dm}^3 \quad \text{CO}_2 \quad (\text{g}) \quad ;$$

$$\text{dm}^3 \text{H}_2 (\text{g}) ;$$

$$V_{\text{celk.}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2} = 1,866 + 3,73 = 5,598 \text{ dm}^3 \text{ směsi plynů CO}_2(\text{g}) \text{ a H}_2(\text{g}).$$

$\text{Fe (s)} + \text{CO}_2 \text{ (g)} \longleftrightarrow \text{FeO (s)} + \text{CO (g)}$	<b>z 1g Fe(s) vznikne 0,4 dm<sup>3</sup> CO(g)</b>
--	--

$$n_{\text{Fe}} = n_{\text{CO}}; \quad V_{\text{CO}} = \frac{V_m}{M_{\text{Fe}}} = \frac{22,4}{55,847} = 0,4 \text{ dm}^3 \text{ CO(g)} ;$$

$3\text{Fe (s)} + 4\text{H}_2 \text{O (g)} \longleftrightarrow \text{Fe}_3 \text{O}_4 \text{ (s)} + 4\text{H}_2(\text{g})$	<b>z 1g Fe(s) vznikne 0,534 dm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>(g)</b>
--	---

$$\frac{n_{\text{Fe}}}{3} = \frac{n_{\text{H}_2}}{4}; \quad V_{\text{H}_2} = \frac{\frac{4 \cdot V_m}{3}}{M_{\text{Fe}}} = \frac{29,86}{55,847} = 0,534 \text{ dm}^3 \text{ H}_2(\text{g}) ;$$

$\text{FeO (s)} + \text{C (s)} \longleftrightarrow \text{Fe (s)} + \text{CO (g)}$	<b>z 1g C(s) vznikne 1,866 dm<sup>3</sup> CO(g)</b>
---	---

$$n_{\text{C}} = \frac{V_{\text{CO}}}{V_m}; \quad V_{\text{CO}} = \frac{V_m}{M_{\text{C}}} = \frac{22,4}{12} = 1,866 \text{ dm}^3 \text{ CO(g)};$$

$\text{CH}_4 \text{ (g)} \longleftrightarrow \text{C (s)} + 2\text{H}_2 \text{ (g)}$	<b>z 1 dm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>(g) vznikne 2 dm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>(g)</b>
--	---

$$n_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{H}_2}}{2}; \quad V_{\text{H}_2} = \frac{2 \cdot V_{\text{CH}_4} \cdot V_m}{V_m} = \frac{2 \cdot 22,4}{22,4} = 2 \text{ dm}^3 \text{ H}_2(\text{g}) ;$$

$\text{CaCO}_3 \text{ (s)} \longleftrightarrow \text{CaO (s)} + \text{CO}_2 \text{ (g)}$	<b>z 1g CaCO<sub>3</sub>(s) vznikne 0,224dm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>(g)</b>
--	---

$$n_{\text{CaCO}_3} = n_{\text{CO}_2}; \quad \frac{n_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CaCO}_3}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_m}; \quad V_{\text{CO}_2} = \frac{V_m \cdot m_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CaCO}_3}} = \frac{22,4 \cdot 1}{100,088} = 0,224 \text{ dm}^3 \text{ CO}_2(\text{g}) ;$$

## Příloha č. 5 Statistické výpočty a hodnoty naměřených hodnot

Vzorce použité při statistickém vyhodnocení naměřených dat:

a) střední hodnota sledované veličiny:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ,$$

kde značí:     n - počet měření (n = 7) [1];

                  i - pořadové číslo měření, sledované veličiny [1];

$x_i$  - naměřenou hodnotu sledované veličiny při i-tém měření.

b) směrodatná odchylka sledované veličiny:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} ,$$

c) rozptyl sledované veličiny:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

d) variační koeficient sledované veličiny:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} .$$

V tabulce této přílohy jsou přehledně zpracovány hodnoty statistických výpočtů pro jednotlivé směsi zpracovaných v této práci, které jsou dále rozděleny dle parametrů na základě kterých byli porovnávány.

## Pokračování Příloha č. 5

Tabulka hodnot statistických výpočtů naměřených hodnot této diplomové práce

Poznámka	Označení směsi	Číslo směsi	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl sledování	Variační koeficient
komplexní směs, 1000°C	15970	4	6,343382	0,486424	0,236608304	0,0373
	20020	3	8,469251	0,254154	0,06459421	0,007627
	15731	1	8,625478	0,501634	0,251636549	0,029174
	15994	5	7,675432	0,106894	0,011426346	0,001489
	TPR 210 F	6	9,183639	0,915109	0,837423763	0,091186
	15947	2	14,94232	0,794992	0,63201206	0,042297
frakce 0,1 mm, 1000°C	20020	3	12,29359	0,354916	0,125965014	0,010246
	15731	1	18,66159	0,751889	0,565336424	0,030294
	15970	4	13,71815	0,862342	0,743633688	0,054208
	15994	5	14,31255	0,407	0,165648873	0,011574
	15947	2	19,07649	0,472529	0,223283591	0,011705
	TPR 210 F	6	12,50154	0,266249	0,070888297	0,00567
Frakce 0,15 mm, 1000°C	20020	3	11,04803	0,382781	0,146521437	0,013262
	15731	1	10,18032	0,178763	0,031956067	0,003139
	15970	4	9,726974	0,572075	0,327269804	0,033646
	15994	5	8,426514	0,443432	0,196632358	0,023335
	15947	2	13,7648	0,294273	0,086596613	0,006291
	TPR 210 F	6	9,240955	0,451034	0,203431987	0,022014
Frakce 0,3 mm, 1000°C	20020	3	7,824274	0,489275	0,239389994	0,030596
	15731	1	7,900583	0,478215	0,228689187	0,028946
	15970	4	6,292894	0,223923	0,050141368	0,007968
	15994	5	5,948332	0,361039	0,130349185	0,021914
	15947	2	10,77619	0,476465	0,227018444	0,021067
	TPR 210 F	6	7,734825	0,362852	0,131661361	0,017022
Frakce 0,4 mm, 1000°C	20020	3	8,279952	0,383956	0,147422575	0,017805
	15731	1	7,464426	0,2927	0,08567308	0,011478
	15970	4	6,316366	0,526853	0,277574593	0,043945
	15994	5	7,050588	0,179791	0,032324846	0,004585
	15947	2	9,061838	0,70874	0,502311924	0,055432
	TPR 210 F	6	9,889352	0,329744	0,108731053	0,010995
800°C	Jádro Cold Box	9	4,006033	0,575414	0,331100829	0,082651
1000°C	Jádro Cold Box	9	5,299786	0,357364	0,127709043	0,024097
1200°C	Jádro Cold Box	9	10,87586	0,704474	0,496283367	0,045632
800°C	Jádro CT Ostašov	7	1,589606	0,884444	0,782240858	0,492097
1000°C	Jádro CT Ostašov	7	2,124986	0,217138	0,047148767	0,022188
1200°C	Jádro CT Ostašov	7	1,610146	0,365008	0,133231094	0,082745
800°C	Jádro Dorsil V	11	2,992423	0,417308	0,174146254	0,058196

1000°C	Jádro Dorsil V	11	2,401019	1,243362	1,545948367	0,643872
1200°C	Jádro Dorsil V	11	2,263824	0,923346	0,852567739	0,376605
800°C	Jádro Hot Box	10	6,048995	0,822356	0,676269521	0,111799
1000°C	Jádro Hot Box	10	8,736798	0,343285	0,117844397	0,013488
1200°C	Jádro Hot Box	10	17,80636	2,315286	5,360547459	0,301047
800°C	Jádro Novanol	8	6,757668	0,589747	0,34780128	0,051468
1000°C	Jádro Novanol	8	11,20419	0,359835	0,129480884	0,011556
1200°C	Jádro Novanol	8	17,00904	1,034118	1,069399275	0,062872

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména §60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 25. 5. 2007

Podpis:

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and consultant.

Date: 25. 5 2007

Signature: